

Etude de l'adéquation des essences aux stations forestières de la forêt de Soignes (Zone bruxelloise) dans le contexte du changement climatique

Rapport final

Décembre 2009

Recherche financée par
l'Institut Bruxellois pour la
Gestion de l'Environnement



Etude de l'adéquation des essences aux stations forestières de la forêt de Soignes (Zone bruxelloise) dans le contexte du changement climatique

Rapport final

Décembre 2009

Réalisation : Ir Julien Daise
Appui scientifique : Dr Hugues Claessens
Direction : Prof. Jacques Rondeux

Ce rapport compile les résultats des recherches liées à deux conventions de recherche passées entre avril 2008 et septembre 2009 entre l'IBGE et GxABT : « Etude de l'adéquation des essences aux stations forestières de la forêt de Soignes (zone bruxelloise) dans le contexte du changements climatique » et « Etude de l'adéquation des essences aux stations forestières dans les bois périphériques de la Région de Bruxelles-Capitale dans le contexte du changement climatique »

Les recherches ont été menées à l'Unité de Gestion des Ressources Forestières et des Milieux Naturels, de la Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) par Julien Daise, Ir forestier engagé par la convention, avec l'appui scientifique du Prof. Hugues Claessens, sous la direction du Prof. Jacques Rondeux.

Les recherches ont bénéficié d'un encadrement scientifique et technique important. Que soient ici remerciés MM. Roger Langohr, Laurent Bock, Damien Sevrin, François Ridremont, Xavier Legrain et Pierre Demarcin pour leurs conseils scientifiques ;

MM. Stéphane Vanwijnsberghe, Nicolas Bronchain, Martine Coulon et Olivier Schoonbroodt pour leur appui sur place ;

Mmes Régine Borremans, Clémence Teugels, MM. Cédric Geerts et Alain Monseur pour leur appui technique lors de la réalisation des mesures complémentaires de terrain.

Table des matières

TABLE DES MATIERES	3
INTRODUCTION	1
PARTIE 1 – LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : ETAT DES LIEUX DES HYPOTHESES	6
Chapitre 1. Changements climatiques déjà observés.....	7
1.1. Au niveau mondial	7
1.2. En France	7
1.3. En Belgique.....	8
1.4. Impacts déjà observés	8
Chapitre 2. Changements climatiques attendus	9
2.1. Modèles climatiques et scénarii d'émissions.....	9
2.2. Température	12
2.3. Régime hydrique.....	15
2.4. Variations des températures et extrêmes.....	17
2.5. Variations des précipitations et extrêmes	19
2.6. Vitesse du vent.....	20
Chapitre 3. Synthèse et conclusion pour la forêt de Soignes.....	22
PARTIE 2 – AUTÉCOLOGIE DES ESSENCES POTENTIELLES DE PRODUCTION DE LA FORET DE SOIGNES.....	25
Chapitre 4. Eco-physiologie du hêtre et des chênes sessile et pédonculé	26
4.1. Dépérissement : généralités	26
4.2. Température	28
4.3. Régime hydrique	33
4.4. Compaction des sols	41
4.5. Pauvreté chimique.....	46
4.6. Vent.....	47
4.7. Neige	48
4.8. Facteurs biotiques	48
4.9. Perspectives.....	51
4.10. CO ₂	51
4.11. Ozone troposphérique	53
4.12. Retombées atmosphériques.....	54
4.13. Facteur âge	56
4.14. Synthèse et conclusion	56
Chapitre 5. Extension de l'étude aux autres essences	81

PARTIE 3 – ANALYSE STATIONNELLE ET DEVELOPPEMENT D’UN CATALOGUE DES STATIONS.....	204
Chapitre 6. Présentation de la zone d’étude	205
6.1. Situation géographique	205
6.2. Contexte écologique.....	206
Chapitre 7. Méthodologie	217
7.1. Méthodologie générale.....	217
7.2. Prétraitement au bureau	218
7.3. Campagne de mesure	227
7.4. Traitement des données.....	237
Chapitre 8. Résultats et discussion	240
8.1. Campagnes de mesure.....	240
Chapitre 9. Catalogue des stations.....	269
9.1. Détermination des US finales	269
9.2. Développement technique du catalogue	274
Chapitre 10. Aptitude des essences forestières	278
10.1. Introduction.....	278
10.2. Aptitude actuelle	279
10.3. Aptitude future	279
Chapitre 11. Questions diverses.....	343
11.1. Existe-t-il une corrélation entre les dépérissements observés et les types de station ?	343
11.2. Est-ce envisageable d’aller vers une cartographie de la compaction superficielle des sols ?.....	345
11.3. Qu’en est-il du risque de chablis sur la zone d’étude ?.....	353
CONCLUSION & PERSPECTIVES.....	355
BIBLIOGRAPHIE	358
ANNEXE 1 – TERRITOIRES ECOLOGIQUES	369
ANNEXE 2 – COMPACTION DES SOLS ET FRAGIPAN	371
ANNEXE 3 – CROISEMENTS SOLS X PHYTOSOCIOLOGIE.....	379

Introduction

Contexte et objectifs

La forêt de Soignes est majoritairement composée de hêtraies. L'image et l'histoire que véhicule cette « hêtraie cathédrale » sont d'une grande importance auprès du public. De ce fait, le projet d'aménagement pour les décennies à venir prévoit un maintien du hêtre dans 65% de la forêt bruxelloise.

Cependant, il est déjà admis que cette hêtraie n'est pas en totale adéquation avec les stations forestières en présence. D'une part, une partie des sols de versants sont relativement secs ; d'autre part, la présence fréquente d'un horizon compacté à une profondeur variable (*Fragipan*) est une entrave au bon développement racinaire du hêtre.

A cette fragilité s'ajoute une question essentielle : Quelle sera l'influence du réchauffement climatique sur cet écosystème en place ? Trois aspects du réchauffement retiennent l'attention :

- L'occurrence d'épisodes chauds qui ne conviennent pas au hêtre, même en présence d'une grande réserve hydrique dans le sol ;
- L'occurrence d'épisodes secs en saison de végétation, qui peut se traduire, dans les sols filtrants ou à enracinement peu profond du fait de la présence d'un *Fragipan*, par un manque de disponibilité en eau provoquant un stress hydrique ;
- L'occurrence de tempêtes, moins nettement affirmée dans les modèles climatiques, mais qui pourrait, le cas échéant, se traduire par une moindre stabilité des arbres, notamment toujours dans ces sols à *Fragipan*.

L'objectif de ce projet est donc de clarifier l'adéquation essence-station et sa variabilité spatiale en forêt de Soignes et, le cas échéant, de proposer des alternatives en matière de choix des essences selon les stations. Dans cette optique, plusieurs objectifs sont à mettre en exergue :

- Etablir les niveaux de risque de la sylviculture du hêtre selon les stations et dans le cadre des changements climatiques.
- Cartographier ces niveaux à partir des informations stationnelles existantes : topographie, pédologie, phytosociologie.
- Proposer des alternatives en matière de choix d'essences, orientées par rapport aux différentes fonctions de la forêt : récréative et paysagère, écologie, production, etc.

Méthodologie générale

La méthodologie générale mise en œuvre pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les essences de la Forêt de Soignes repose sur le concept de catalogue de stations.

Celui-ci postule l'identification de situations écologiques - types : les types de station ou unités stationnelles (US) en tant qu'entité homogène des points de vue climat, topographie et sol) caractérisées par une combinaison particulière de variables écologiques (étapes en bleu sur la figure 0).

L'ensemble de ces UE rassemblées dans le catalogue de stations constitue le système de référence qui sera à la base de l'interprétation des conditions écologiques de la forêt de Soignes et de l'adéquation des essences à leur milieu.

L'intérêt de cette méthode réside dans le fait que les UE représentent des situations que l'on peut se représenter concrètement, de telle sorte que le catalogue constitue un outil que les gestionnaires forestiers peuvent aisément s'approprier car il est conçu à leur échelle de perception et d'action. Le développement de l'outil « catalogue des stations » dépasse donc le contexte de l'adéquation des essences aux stations.

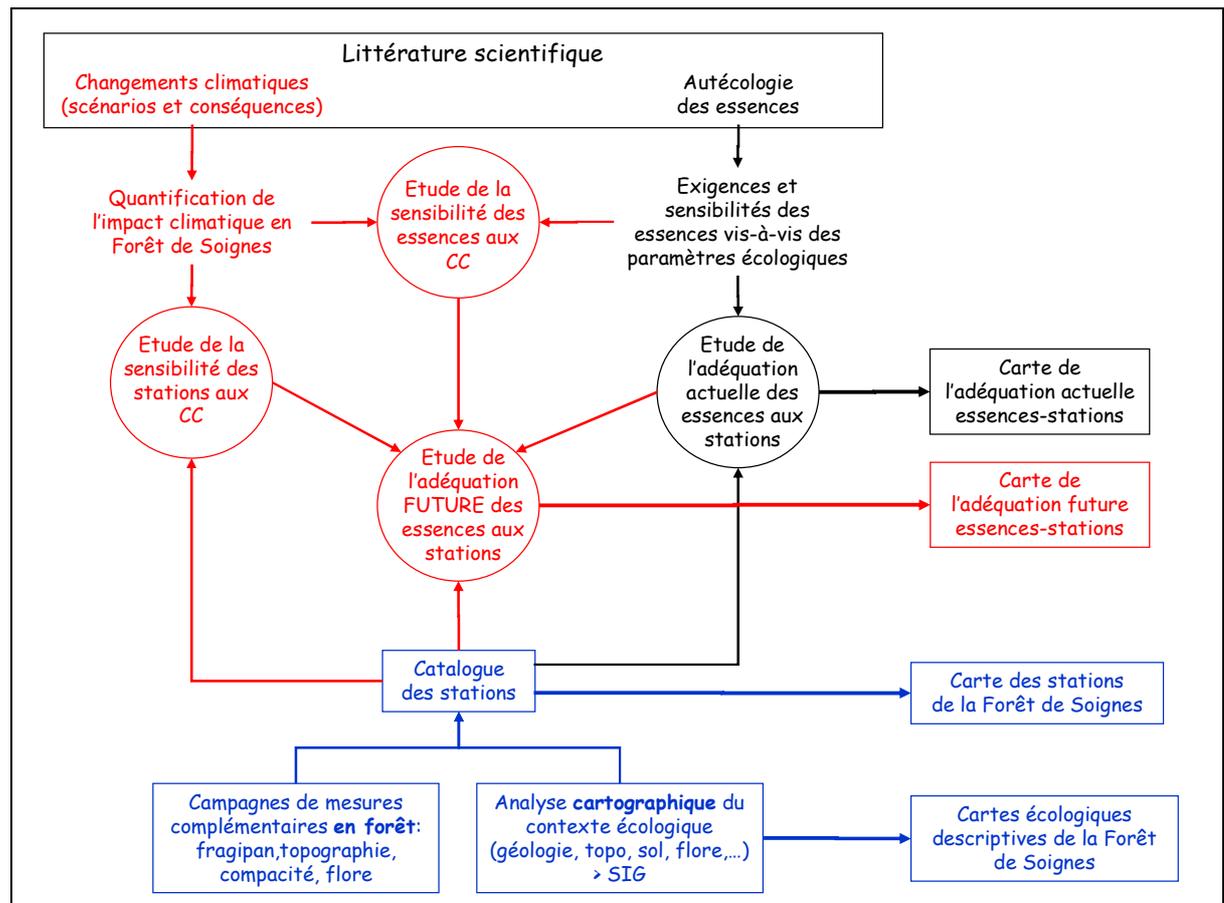


Figure 0 – Méthodologie générale de l'étude

Par ailleurs, la littérature scientifique et les outils existants (Guide du Boisement (GB), Fichier Ecologique des Essences (FEE), Flore Forestière Française (FFF),...) permettent d'établir les exigences et sensibilités des essences vis-à-vis de différents paramètres écologiques. Ces derniers étant définis pour chaque US du catalogue de stations, il est possible d'établir l'adéquation actuelle des essences aux stations (filière en noir dans la figure 0) et de produire des cartes d'adéquation, encore nommées cartes d'aptitude ou de potentialités.

Pour établir l'adéquation future des essences aux stations (filière en rouge dans la figure 0), il faut d'abord identifier, à partir de la littérature existante, l'impact des changements climatiques sur le climat de la forêt de Soignes et les sensibilités intrinsèques des stations à ces changements. Ensuite, les sensibilités des essences à l'évolution des paramètres

climatiques et locaux peuvent être déduites de la littérature et des outils d'interprétation existants.

Cette double analyse permet d'établir un glissement de l'adéquation des essences aux stations, d'une manière empirique, par interprétation. C'est donc essentiellement une démarche d'expertise, qui est grandement facilitée par l'outil « catalogue de stations ».

Lors de l'utilisation de ces résultats dans la gestion forestière, il faut donc garder en tête leur caractère relativement approximatif, issu d'une démarche empirique. Il n'y a probablement pas de grandes erreurs sur les tendances évolutives de l'adéquation des essences aux stations, mais l'intensité de l'impact des changements climatiques sur cette adéquation est plus relative. Néanmoins, dans l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de modèles suffisamment précis du comportement écophysologique des essences et de l'évolution des paramètres écologiques des stations pour procéder de manière plus exacte.

Plan du rapport

Partie 1 : changements climatiques : état des lieux et des hypothèses.

En réponse à ces différents objectifs, différentes lignes de route et différents outils sont à employer :

- Partie 1 & 2, recherches bibliographiques : ces recherches permettent de faire le point sur les connaissances de l'écophysologie des trois grandes essences productives feuillues présentes dans le massif sonien : le hêtre, le chêne pédonculé et le chêne sessile. Parallèlement, le point sur les prévisions de l'évolution des paramètres climatiques permet d'énoncer, à des niveaux de précisions variables, quels seront les grands changements dans nos régions. En confrontant ces deux aspects, il s'agit de conclure, si facteur limitant il y a, dans quelle mesure le hêtre se maintiendra en forêt de Soignes.
- Partie 3, recherches bibliographiques complémentaires : la prolongation de l'étude a permis l'extension de la recherche bibliographique aux essences suivantes : Chêne rouge, Erable sycomore, Frêne commun, Charme, Merisier, Robinier faux-acacia, Bouleau verruqueux, Sapin de Vancouver, Mélèze d'Europe, Mélèze du Japon, Pin sylvestre, Pin noir d'Autriche, Pin noir de Corse, Pin noir Koekelare, Tilleul à petites feuilles, Tilleul à grandes feuilles, Châtaignier, Noyer commun, Noyer noir, Noyer hybride, Cèdre de l'Atlas, Cèdre du Liban, Cèdre de l'Himalaya.. Une synthèse de cette bibliographie est présentée sous forme de fiches espèces. Dans la mesure des connaissances actuelles, les mêmes facteurs abordés pour le hêtre et les deux chênes sont détaillés.
- Partie 4, réalisation d'un catalogue des stations : l'outil que représente le catalogue des stations permet d'affiner au mieux les paramètres (topographie, pédologie, géologie, etc) influençant la végétation, aussi bien de la strate herbacée que des strates arbustives et arborées. La potentialité sylvicole qui accompagne ces Unités

Stationnelles (US) permettra de caractériser au mieux les aires optimales pour chaque essence. Cet outil développé, il reste un pas à franchir afin de déterminer le risque associé face au réchauffement climatique, et ce à l'échelle de chaque US. Une gradation dans le risque peut également être introduit au sein même d'une US.

Partie 1 – Les changements climatiques : état des lieux des hypothèses

Cette première partie s'attache à identifier l'évolution du climat, d'une manière globale, mais également à l'échelle de la forêt de Soignes puisque cette étude bénéficie de la meilleure station météo de Belgique avec la station de l'observatoire d'Uccle. Une première section reprendra brièvement les constats déjà observés du réchauffement climatique. La section suivante s'attellera à synthétiser les avancées réalisées quant à la simulation de l'évolution du climat jusqu'au siècle prochain. Une synthèse reprendra les conditions auxquelles on peut s'attendre à l'horizon 2100 en forêt de Soignes.

Chapitre 1. Changements climatiques déjà observés

1.1. Au niveau mondial

Depuis quelques années seulement, il a été mis en évidence les variations suivantes (GIEC2001, (Salinger, 2005)) :

- Température : on observe un réchauffement de l'ordre de 0,6 C° depuis 1860. Neuf des années les plus chaudes se situent entre 1995 et 2004. Cette augmentation de la température ne s'est pas réalisée de manière homogène sur le globe.
- Précipitations : à l'échelle globale, la tendance est moins claire. En Europe, on observe une augmentation des précipitations de 10 à 40% dans les régions du nord (European_Environment_Agency, 2004). Inversement, une diminution allant jusqu'à 20% est observée en zone méditerranéenne.

1.2. En France

Divers constats sont déjà soulignés sur des changements climatiques avérés :

- Température et précipitations : au nord de la France, une augmentation simultanée de ces deux facteurs provoquent une accélération du cycle de l'eau, le climat s'en trouve plus humide (Lebourgeois et al., 2001; Seguin, 2007).
- Insolation : toujours en France, une diminution de 11% est constatée dans le nord et une augmentation de 7% dans le sud (Moisselin et al., 2003).
- Episodes extrêmes : plusieurs faits récents ont retenu l'attention dont les tempêtes de 1999 et les sécheresses successives de 2003, 2004 et 2005. Cependant, il est encore difficile pour les climatologues de conclure à une tendance significative (Seguin, 2007).

1.3. En Belgique

La station d'Uccle, à proximité immédiate de la forêt de Soignes, nous fournit des statistiques climatiques depuis 1833. L'évolution des températures depuis cette période est illustrée sur la Figure 1. Cette augmentation de la température (+ 1,5 °C à + 2,0 °C) est supérieure à la moyenne mondiale. Cette différence est due à un réchauffement plus accentué pour les latitudes plus élevées. Ce réchauffement est également plus élevé sur les continents. Conséquence à cette élévation de température, une augmentation de la saison de végétation a déjà été observée pour plusieurs espèces arborées caducifoliées (*Alnus incana*, *Alnus glutinosa*, *Betula pendula*,...) (Linkosalo et al., 2008).

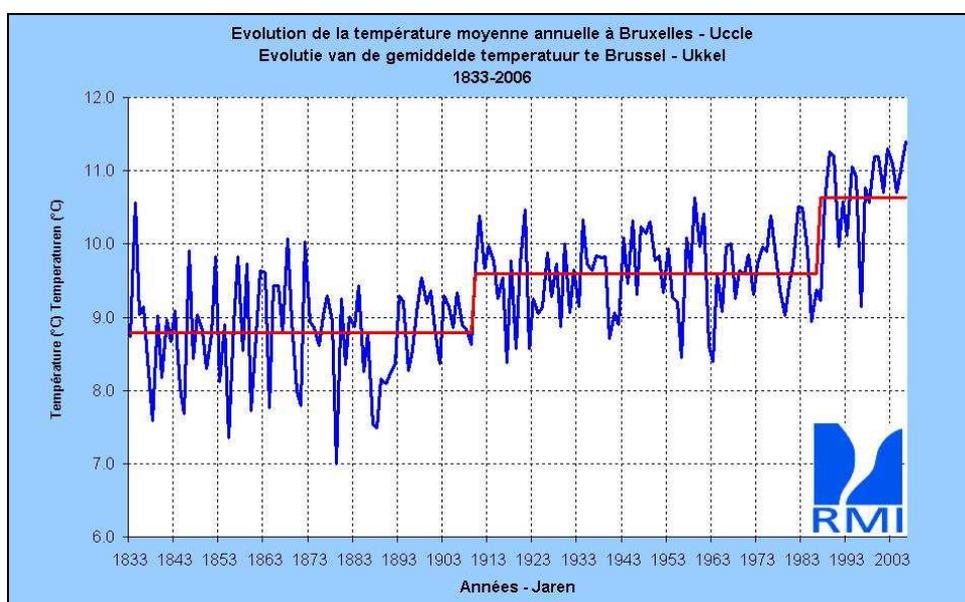


Figure 1 - Evolution de la température moyenne annuelle mesurée à Uccle depuis 1833 (Source IRM 2007)

1.4. Impacts déjà observés

Nous n'allons pas entrer dans les détails de la multitude de faits avérés et d'indices d'un réchauffement climatique. Citons simplement les domaines en jeu dans la problématique, ainsi que le nombre d'études sur ces sujets (3^{ème} rapport GIEC 2001, 4^{ème} rapport GIEC 2007) :

- Faune-Flore : 44 études sur 600 espèces, environ 550 espèces ont montré un changement, environ 450 dans le sens attendu.
- Glaciers : 16 études sur 150 sites, changement sur 100 sites, 99 dans le sens attendu.
- Cryosphère : 13 études.
- Hydrologie et ressources en eau : 22 études.
- Processus côtiers : 30 études.
- Systèmes biologiques marins et d'eau douce : 37 études.
- Systèmes biologiques terrestres : 156 études.
- Agriculture et forêt : 32 études.

Chapitre 2. Changements climatiques attendus

2.1. Modèles climatiques et scénarii d'émissions

2.1.1. Modèles climatiques

Pour rester bref, reprenons la définition proposée par le GIEC (2007, AR4) : « Représentation numérique du système climatique fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et sur leurs processus d'interaction et de rétroaction et qui tient compte de la totalité ou d'une partie de ses propriétés connues. Le système climatique peut être représenté par des modèles d'une complexité variable : autrement dit, pour une composante ou une combinaison de composantes donnée, on peut définir un spectre ou une hiérarchie de modèles différant par certains aspects tels que le nombre de dimensions spatiales, le degré de représentation explicite des processus physiques, chimiques ou biologiques ou le degré d'inclusion de paramétrisations empiriques. Les modèles de la circulation générale couplés atmosphère océan (MCGAO) fournissent une représentation d'ensemble du système climatique, qui est une des plus complètes du spectre actuellement disponible. Une évolution se dessine vers des modèles plus complexes à chimie et biologie interactives. Les modèles climatiques sont des outils de recherche pour l'étude et la simulation du climat et servent aussi à des fins opérationnelles, notamment pour les prévisions climatiques mensuelles, saisonnières et interannuelles ».

Ces modèles sont appliqués à une représentation simplifiée de l'espace, matérialisée par un découpage en grille 3D possédant une maille actuelle de 110 km (GIEC 2007) contre une maille de 500 km de côté dans les années 80. Il existe actuellement une quinzaine de modèles globaux de par le monde, ceux-ci ont été construits par autant d'équipes pluridisciplinaires. Actuellement et d'une manière de plus en plus fine (attention, il reste bien entendu des zones d'ombre), les modèles prennent en compte les facteurs suivants :

Echanges d'énergie : principalement sous forme électromagnétique et prenant en compte les échanges entre terre, océan, atmosphère, espace.

- Circulation de l'air : dans l'atmosphère et transports d'eau associés.
- Circulation océanique et interactions océans/atmosphère
- Formation et fonte de la glace de mer
- Nuages : attention, il y a encore une forte marge de progrès quant à la modélisation de la formation des nuages.
- Echanges de carbone : entre l'atmosphère et la planète, comprend des degrés de sophistication variables.

Différents paramètres doivent encore être mieux pris en compte dans les modèles :

- Nuages : car ce sont des objets de petites tailles par rapport à la dimension de la maille.
- Puits de carbones : océaniques et continentaux, notamment réactions de la biosphère face à un changement climatique.
- Evaporation continentale : fait intervenir des processus à plus petites échelles.
- Circulation océanique profonde : difficile à mesurer.
- Cycle du méthane : les sources naturelles ne sont pas quantifiées avec précision.
- Ozone troposphérique : chimie atmosphérique complexe.

2.1.2. Scénarii d'émissions

Afin de prévoir les changements climatiques, nous devons également estimer l'évolution de toute une série de facteurs d'origine anthropique : polluants, gaz à effet de serre, etc. Un exemple, nous connaissons les quantités de gaz à effet de serre déjà émises dans l'atmosphère, mais nous ignorons la quantité injectée à partir d'aujourd'hui, jusqu'aux prévisions voulues (an 2100). Ces émissions vont naturellement fortement influencer les changements climatiques. En ce sens et pour faire tourner les modèles climatiques, une série de scénarii ont été mis au point afin de couvrir le panel de situations plausibles dans l'avenir. Le GIEC utilise 40 scénarii, qui sont regroupés en 4 « familles ». Ces familles correspondent à un projet de société particulier, où différents facteurs sont fixés : démographie, pratiques agricoles, évolution des technologies, répartition des richesses, etc. Ces facteurs sont ensuite rentrés dans un modèle qui en déduit le facteur « émissions de gaz à effet de serre ». Ces 4 familles sont développées de manière succincte pour aider à la suite de la lecture de la partie bibliographique de cette étude :

Famille A1 : décrit un monde dans lequel la croissance économique sera très rapide. La population mondiale atteindra 9 milliards en 2050, puis diminuera. De nouvelles technologies énergétiquement efficaces seront introduites rapidement. Le revenu par habitant et le mode de vie converge entre les différentes régions. Parallèlement, les interactions sociales et culturelles augmentent également. Cette famille se scinde en trois groupes en fonction de l'intensité d'utilisation des énergies fossiles : A1FI pour « *Fossil Intensive* », A1T pour les énergies autre que fossiles, A1B pour un équilibre entre les deux.

Concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 : **1100 ppm** pour le scénario A1C-MESSAGE (variante A1FI) (soit 3 fois la concentration actuelle). **570 ppm** pour le scénario A1T-MARIA (variante A1T) (50% en plus que la concentration actuelle). **700 ppm** pour le scénario A1B (soit deux fois plus qu'actuellement)

Famille A2 : décrit une société très hétérogène. La population mondiale atteint 15 milliards en 2100, en continuant d'augmenter. Le développement économique a une orientation régionale. Idem pour la pénétration des technologies énergétiquement efficaces, elle est plus fragmentée que dans les autres familles.

Concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 : **900 ppm** pour le scénario A2-MiniCAM (soit 2,5 fois en plus que la concentration actuelle).

Famille B1 : ce projet sociétal est orienté vers une viabilité économique, sociale et environnementale, mais sans initiative supplémentaire par rapport à aujourd'hui en matière climatique. La population atteint 9 milliards en 2050, puis décroît après. Les nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont utilisées massivement.

Concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 : **450 ppm** pour le scénario B1T-MESSAGE (20% en plus que la concentration actuelle).

Famille B2 : l'économie devient de plus en plus locale, axée également vers les trois pôles : économique, social et environnemental. Aucune initiative supplémentaire n'est prise en matière climatique. La population mondiale croît plus lentement (10 milliards en 2100), mais de manière continue. La répartition des richesses est hétérogène, mais moins que le scénario A2. Etant axé sur une économie plus régionale, les nouvelles technologies énergétiquement efficaces se développent différemment en fonction des régions.

Concentration atmosphérique de CO₂ en 2100 : **740 ppm** pour le scénario B2-AIM (2 fois plus qu'aujourd'hui).

Malgré un nombre relativement limité de scénarii, cela peut mener à des évolutions très différentes d'émissions de gaz à effet de serre. La Figure 2 synthétise le comportement des différents scénarii. Le scénario IS92 est celui utilisé par les rapports GIEC plus anciens, il date de 1995.

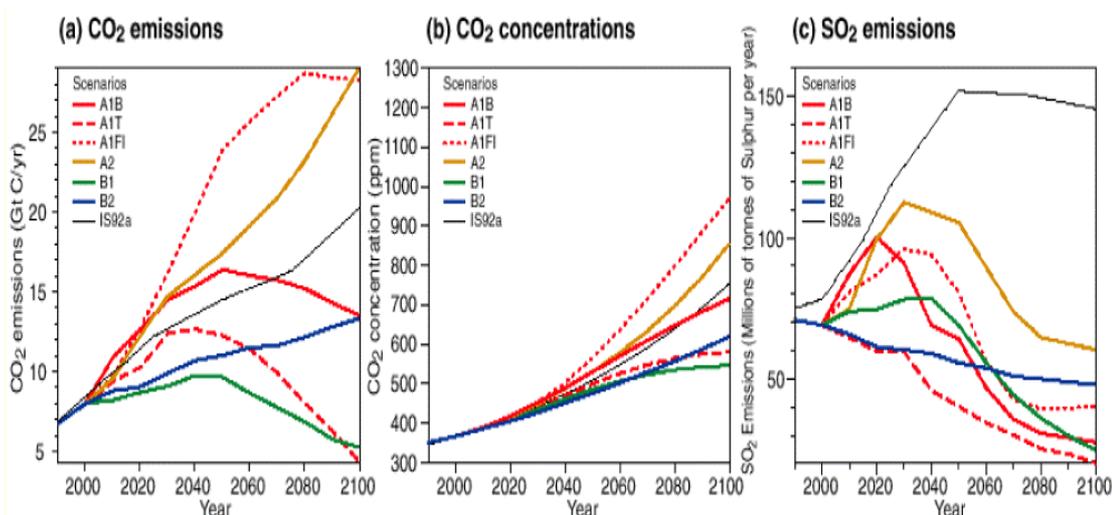


Figure 2 - Evolution des émissions de CO₂ dans l'atmosphère (a) et des concentrations en CO₂ dans l'atmosphère (b) selon les différents scénarii (source: GIEC 2000)

Selon les différents scénarii d'émissions, on peut également, par l'intermédiaire de différents modèles, simuler l'augmentation de la température au niveau mondial. La Figure 3 reprend ces prédictions en fonction des différents scénarii. Les barres à droite du graphe matérialisent les différences dues aux modèles utilisés, et ce pour chaque scénario. Tous scénarii confondus, l'élévation de température à l'échelle mondiale et en 2100 est estimée entre 1 et plus de 6°C.

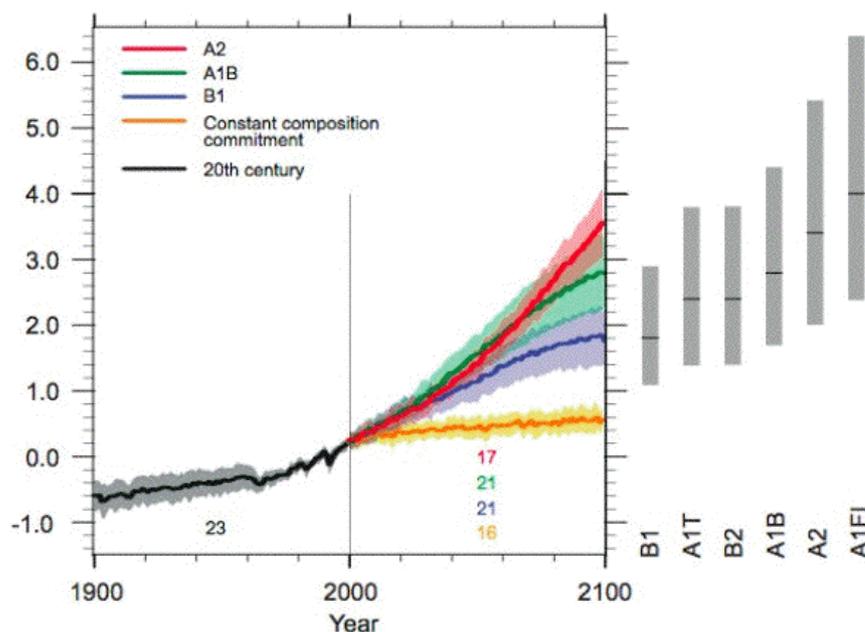


Figure 3 - Prédiction de l'évolution de la température jusqu'en 2100, et ce selon les différents scénarii d'émission de CO₂ (GIEC 2007, AR4)

2.2. Température

2.2.1. Au niveau mondial

Selon les différents scénarii, les prévisions de l'évolution des températures prévoient une augmentation de la température globale entre 1,1 et 6,4 °C (GIEC 2007, AR4). Comme présenté à la Figure 4, cette augmentation de température n'est pas uniforme sur l'ensemble de la planète. Les écarts seront plus marqués aux plus hautes latitudes. C'est le scénario A1B qui a été retenu par le GIEC pour illustrer les prévisions développées dans les paragraphes suivants.

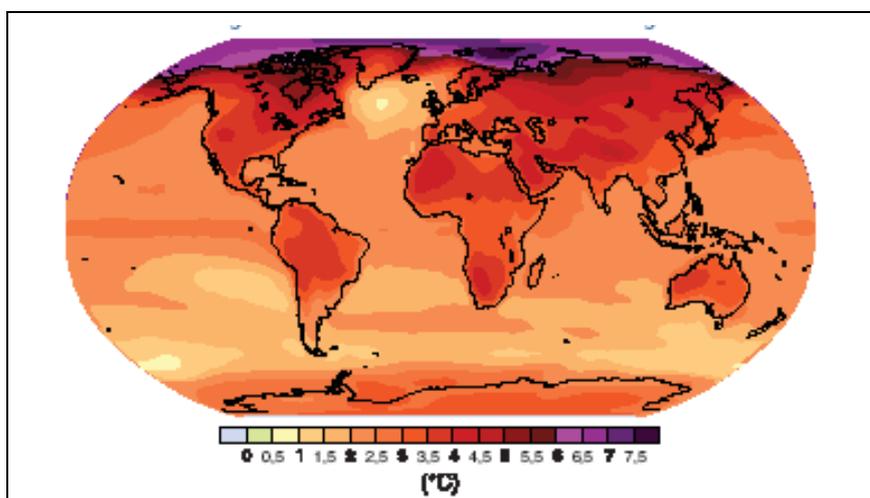


Figure 4 - Evolution projetée de la température en surface pour la fin du 21^{ème} siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999, selon les projections moyennes obtenues avec plusieurs modèles de la circulation générale couplés atmosphère/océan pour le scénario A1B du SRES (source : GIEC 2007, AR4)

2.2.2. En Europe

Si l'on observe les températures annuelles, les plus hautes latitudes subissent un réchauffement plus élevé qu'au sud. Cependant, cette augmentation des températures varie en fonction des saisons (Figure 5). En hiver (décembre/janvier/février), l'augmentation est plus élevée au Nord de l'Europe, on observe donc un radoucissement des hivers généralisé mais plus marqué au nord. Par contre, en été, c'est la région méditerranéenne qui accuse les plus grandes augmentations.

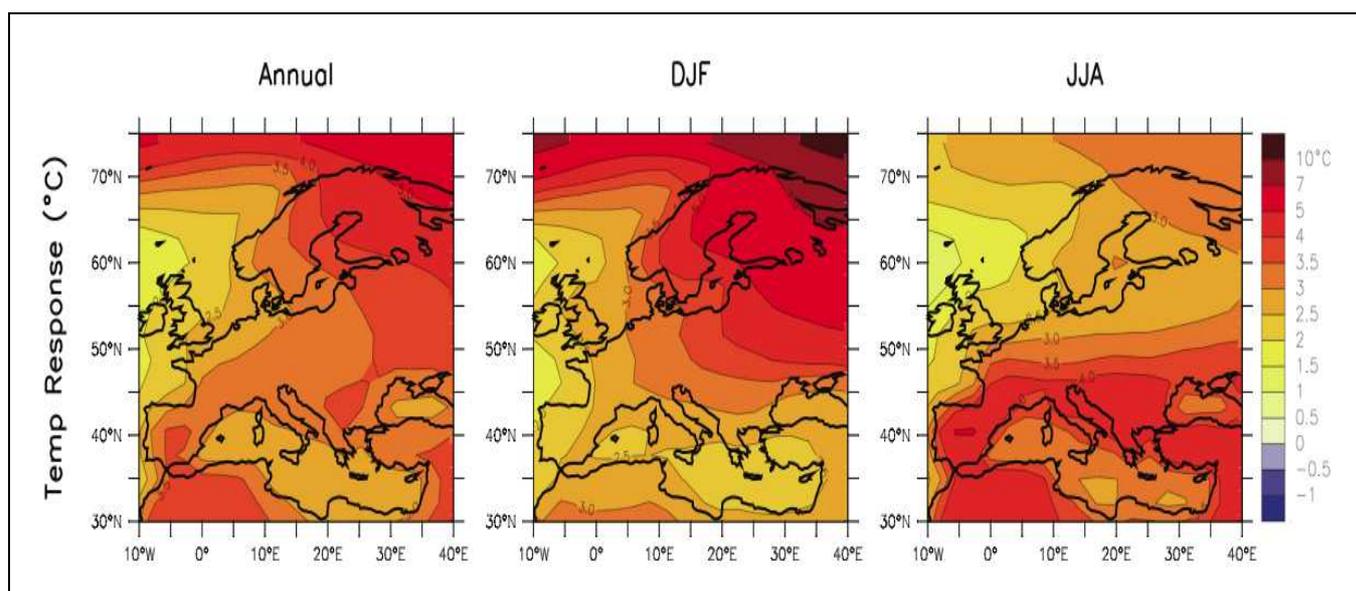


Figure 5 - Ecarts de températures projetés en Europe en 2100, en moyenne annuelle et pour les saisons d'hiver (DJF) et d'été (JJA), par rapport à 1980-1999 (GIEC 2007, AR4), pour le scénario SRES A1B. Ces valeurs représentent une moyenne de 21 modèles de circulation générale, dont les résultats diffèrent partiellement, impliquant notamment une incertitude quant à la répartition géographique régionale des changements. (GIEC 2007, AR4)

2.2.3. En Belgique

Si l'on s'intéresse à notre pays, et plus particulièrement en terme de régions forestières, on peut simplifier le nord du Sillon Sambre-et-Meuse et le sud et simuler les augmentations de températures pour ces deux aires (Figure 6).

L'exemple de la Figure 6 doit être pris avec prudence car l'incertitude liée aux difficultés de la modélisation climatique est plus importante à l'échelle régionale. A émissions de GES égales, l'augmentation des températures pourrait être plus forte (jusque + 6°C, voire plus) ou moins forte. Les Figure 6 et Figure 7 font par ailleurs l'hypothèse qu'on peut diviser le réchauffement en une composante planétaire et un facteur de répartition régionale, d'une façon trop simplifiée pour être entièrement réaliste. Cet exemple est un aperçu que les recherches en cours et futures contribueront à améliorer. Notons une augmentation de 3,2 °C pour la moyenne annuelle (moyenne de 8,9°C fin 20^{ème} siècle à 12,1 °C fin 21^{ème} siècle). Une augmentation moyenne de plus de 4°C est à signaler pour les mois de juin, juillet, août (moyenne de 16°C fin 20^{ème} siècle à 20,3 °C fin 21^{ème}). Enfin, si l'on considère la période de

végétation comprise entre avril et octobre, une augmentation moyenne de 3.4°C est prévue par ce modèle (moyenne de 12,8°C fin 20^{ème} siècle à 16,2°C fin 21^{ème}).

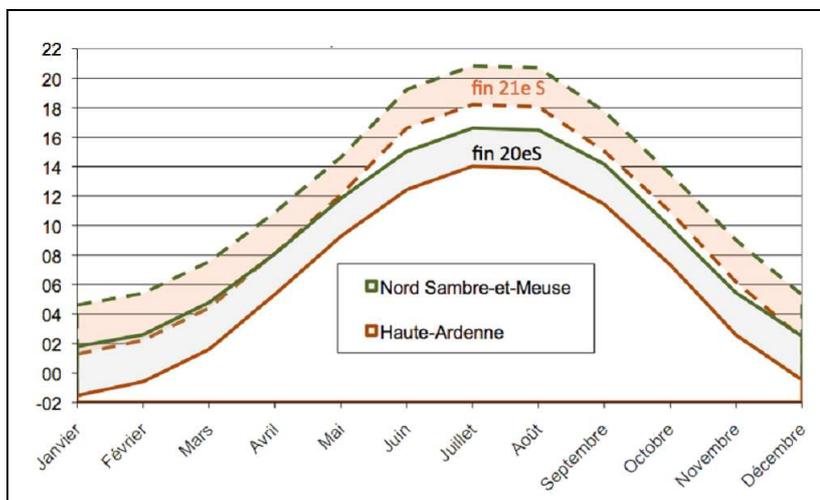


Figure 6 - Evolution de la température moyenne actuelle et projetée par régions forestières (en °C) selon le scénario d'émissions SRES A1B du GIEC (approximativement « central » en terme de températures planétaires dans l'AR4) (Groupe de travail sur les impacts du réchauffement climatique sur les forêts wallonnes, 2008)

Enfin, le choix du scénario d'émissions SRES A1B est illustratif de ce que pourrait être l'évolution des émissions. En effet, le GIEC n'a défini aucun futur « plus probable ». Pour mettre en évidence les conséquences de cette incertitude en matière d'émissions de GES, la Figure 7 indique ce que pourrait être le réchauffement en Belgique si la hausse de température mondiale est limitée à 2°C par rapport à l'époque pré-industrielle, ce qui constitue l'objectif politique européen, et est généralement considéré à même de maintenir les impacts mondiaux du réchauffement à un niveau relativement limité.

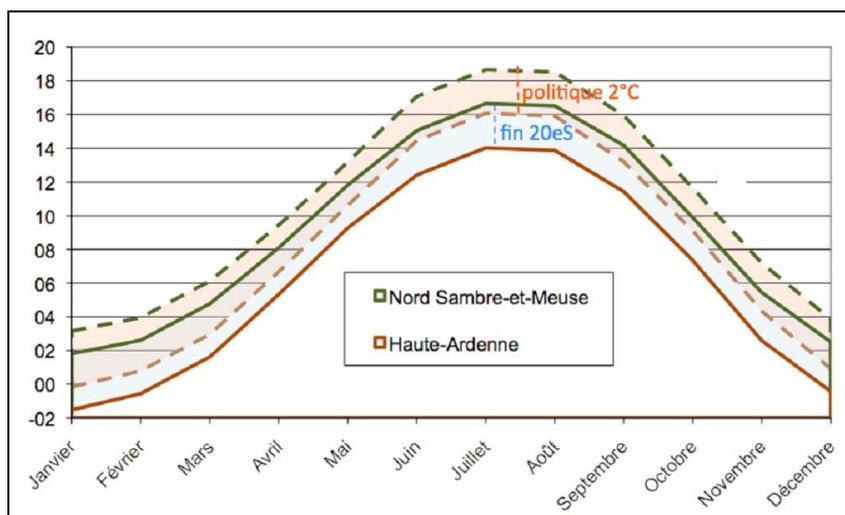


Figure 7 - : Evolution de la température moyenne actuelle et projetée par région forestière (en °C) pour un réchauffement global de 2°C par rapport à l'époque pré-industrielle (graphiques construits selon les climatogrammes IRM et sur base des projections d'écarts des températures pour le scénario A1B du GIEC combinées à la moyenne des résultats obtenus pour la Belgique dans le projet européen PRUDENCE) (Groupe de travail sur les impacts du réchauffement climatique sur les forêts wallonnes, 2008)

En 2100, la Haute-Ardenne pourrait donc bénéficier des températures similaires aux températures actuelles du nord du Sillon Sambre-et-Meuse, avec cependant des mois d'hiver un peu plus froids. De plus, plus aucun mois ne présenterait de températures moyennes négatives et conséquence sur la flore, la période de végétation pourrait être allongée de 3 à 4 semaines (Figure 6).

En ce qui concerne le nord du Sillon Sambre-et-Meuse, on pourrait assister à une augmentation des températures estivales de plus de 4°C. L'augmentation serait moindre (environ 2°C) pour le reste de l'année.

Ce réchauffement est donc manifeste tant en été qu'en hiver. Nous devons dès lors nous préparer à une raréfaction progressive des hivers froids et de la couverture neigeuse associée. Si le réchauffement reste très modéré, il ne sera pas sans conséquences, mais ne devrait pas faire disparaître toute période « froide » car la variabilité naturelle de la météo est importante.

2.3. Régime hydrique

2.3.1. Au niveau mondial

La Figure 8 illustre les projections multimodèles des variations du régime des précipitations. Un point exprime donc la moyenne de ce qui ressort de plusieurs modèles climatiques. Les zones en pointillés sont les plus significatives quant au sens de la prévision, car plus 90% des modèles utilisés vont dans le même sens de variation pour cette zone. En hiver, une augmentation des précipitations est prévue (de 5 à 10%). En été, la prévision a plus de poids et estime une diminution de -10 à -20% des précipitations pour nos régions.

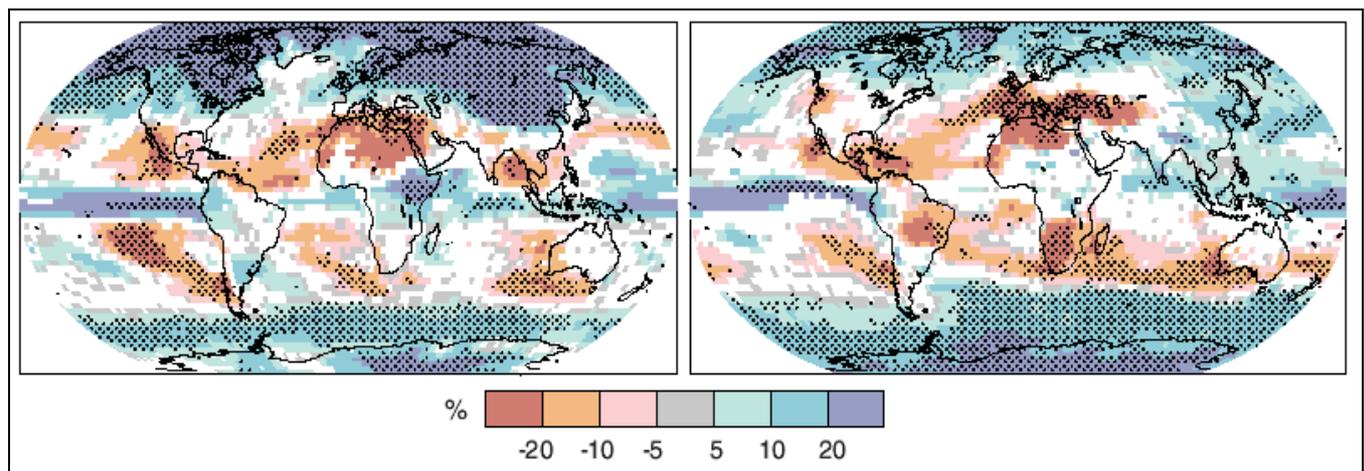


Figure 8 - Variations relatives du régime des précipitations (%) pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs indiquées sont des moyennes tirées de plusieurs modèles, obtenues à partir du scénario A1B du SRES pour des périodes allant de décembre à février (à gauche) et de juin à août (à droite). Les zones en blanc correspondent aux régions où moins de 66 % des modèles concordent sur le sens de la variation et les zones en pointillé à celles où plus de 90 % des modèles concordent sur celui-ci (GIEC 2007, AR4)

2.3.2. En Europe

En observant la Figure 9, les prévisions placent en Europe une charnière virtuelle entre augmentation et diminutions des précipitations. Du point de vue des moyennes annuelles, une diminution de ces précipitations est prévue pour la région méditerranéenne jusqu'à la latitude 50°N (Nord de la France). Cependant, le régime hydrique diffère selon les saisons. En hiver, des déficits pluviométriques sont prévus dans l'extrême sud de l'Europe, à savoir la péninsule ibérique, le sud de l'Italie, la Grèce. Une augmentation d'environ 15% des précipitations est prédite dans nos régions. En été, le déficit pluviométrique s'étend jusqu'en dessous de la Scandinavie. Les prévisions projettent une diminution de 10-15% des pluies pour nos régions.

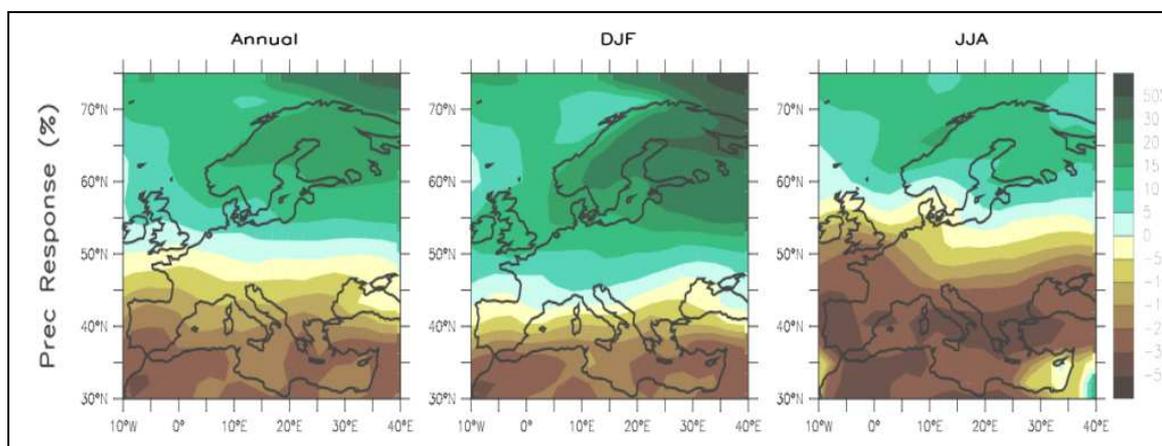


Figure 9 - Ecarts (%) de précipitations projetés en Europe en 2100, en moyenne annuelle et pour les saisons d'hiver (DJF) et d'été (JJA), par rapport à la situation 1980-1999 (GIEC 2007, AR4), pour le scénario SRES A1B. Ces valeurs représentent une moyenne de 21 modèles de circulation générale, dont les résultats diffèrent partiellement, impliquant notamment une incertitude quant à la répartition géographique régionale des changements. (GIEC 2007, AR4)

2.3.3. En Belgique

Les projections prévoient pour 2100 une hausse de 3 à 30% des précipitations hivernales. Pour les précipitations estivales, selon les prédictions, les variations se situeraient entre un statu quo et une diminution allant jusqu'à 50%.

Comme illustré à la Figure 10 (application pour le Nord du sillon Sambre-et-Meuse), la disparition du pic de précipitations estivales est projetée, et ce pour les deux régions : Haute-Ardenne et Nord Sambre-et-Meuse. Divers périodes sont à prendre en considération :

- Les précipitations diminueraient en moyenne de 15% au cours de la période de végétation : considérée d'avril à octobre, les précipitations moyennes en période de végétation passent de 470mm actuellement à 400mm pour 2100.
- Point de vue précipitations annuelles moyennes, les différences saison hivernale et estivale se compensent plus ou moins : on passe de 770mm actuellement à 740mm pour l'horizon 2100.
- Pour les mois de juin-juillet-août, la diminution serait de 24% entre la situation actuelle et l'horizon 2100 (de 218 à 166mm).
- Pour les mois de décembre-janvier-février, une augmentation de 18% est à prévoir entre la situation actuelle et 2100 (de 182 à 214mm).

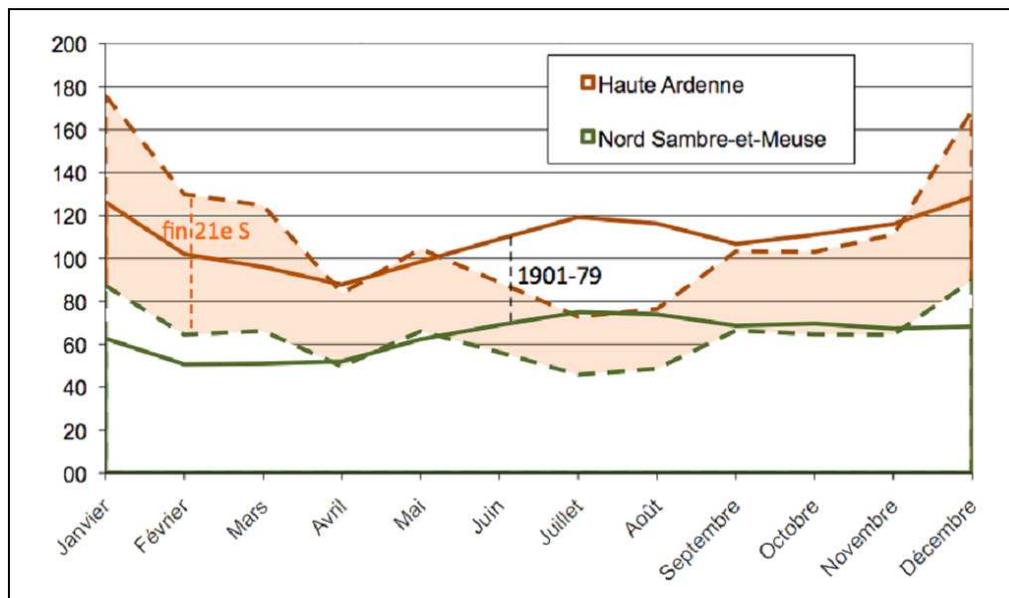


Figure 10 - Evolution des précipitations actuelle et projetée par régions forestières (en mm/mois) (graphique construit selon les climatogrammes IRM disponibles sur le site www.meteo.be) (Groupe de travail sur les impacts du réchauffement climatique sur les forêts wallonnes, 2008)

2.4. Variations des températures et extrêmes

2.4.1. Au niveau mondial et en Europe

Nos régions risquent de voir les vagues de chaleurs augmenter en fréquence, en intensité et en durée (Barnett et al., 2006; Clark et al., 2006; Tebaldi et al., 2006). A l'opposé, le nombre annuel de jours de gel va probablement diminuer (Tebaldi et al., 2006).

Au niveau du globe, Tebaldi et al. (2006) présentent des simulations prenant en compte 9 modèles climatiques (Figure 11). La projection prévoit une diminution des jours de gel (-1 à -2 unité écart type dans nos régions). Point de vue vague de chaleur, une augmentation de ces phénomènes climatiques extrêmes est attendue (de 3 à plus de 3,75 unité écart type dans nos régions). Enfin, conséquence du réchauffement, la longueur de la saison de végétation augmente également selon la simulation (de 0,75 à 2,25 unité écart type dans nos régions). Chaque série de modèle climatique est standardisé sur la période 1980-1999, puis normalisée et comparée à la tendance de la période 1960-2099. Les modèles sont ensuite rassemblés en une moyenne, au niveau global et régional. Donc les changements exprimés dans la Figure 11 le sont en écart-type (par rapport à la tendance globale).

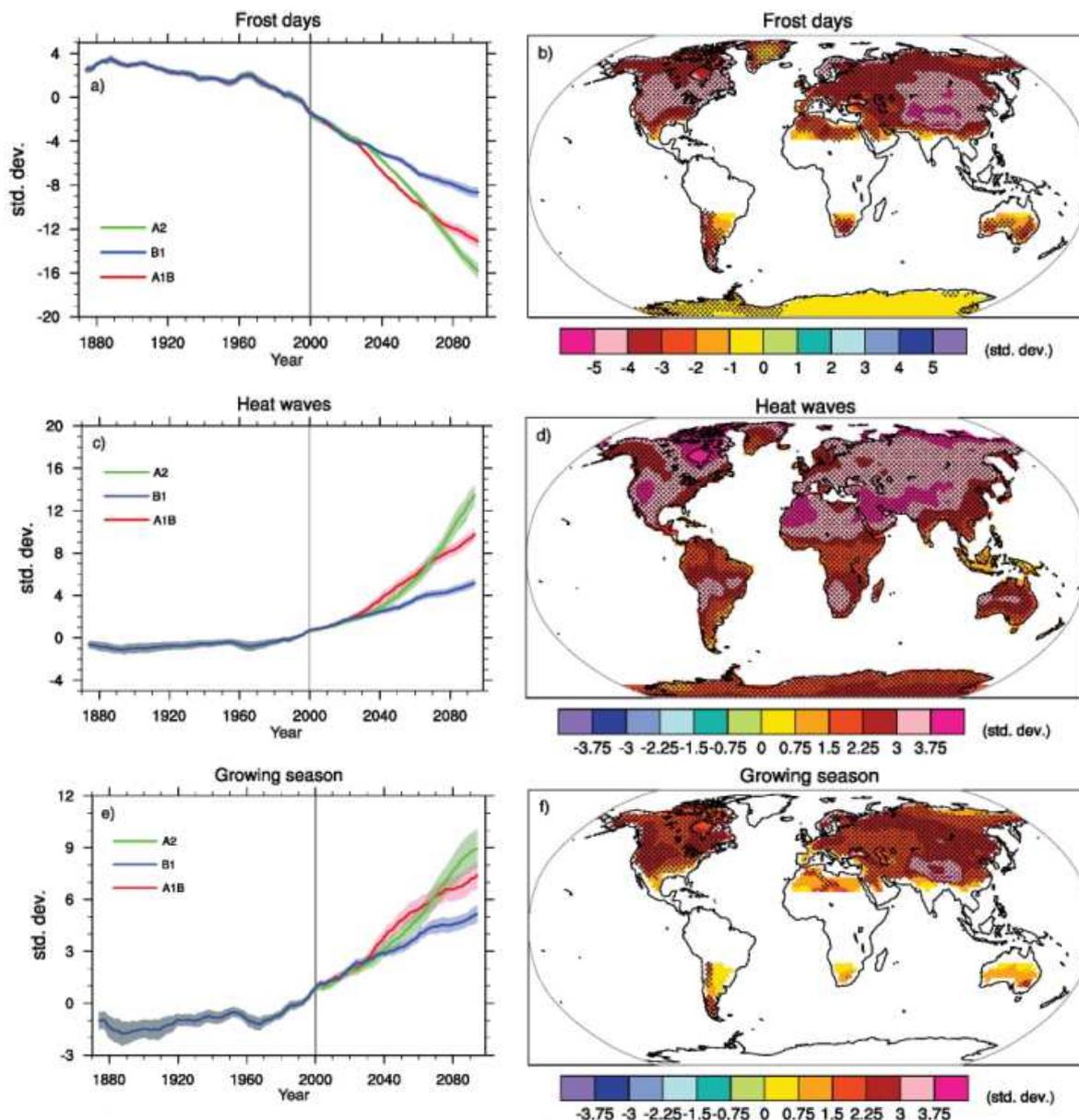


Figure 11 – Evolution des extrêmes basée sur des simulations multi-modèles, adapté de Tebaldi et al. (2006) (GIEC 2007, AR4).

- a) Moyenne mondiale de l'indice « jours de gel » (*Frost days*) projetée jusqu'en 2100 et pour les scénarii B1, A1B, A2. L'indice « jours de gel » est défini comme suit : dans une année, le nombre total de jours où la température minimum absolue est inférieure à 0 °C.
- b) Projection spatiale de la variation de l'indice moyen « jours de gel » (*Frost days*) (scénario A1B) entre les deux périodes suivantes : 1980-1999 et 2080-2099.
- c) Moyenne mondiale de l'indice « vague de chaleur » (*Heat waves*) projetée jusqu'en 2100. L'indice « vague de chaleur » est défini comme suit : la plus longue période (en jours) de l'année d'au moins 5 jours consécutifs avec une température maximale supérieure d'au moins 5°C à la climatologie de ce même jour du calendrier.
- d) Projection spatiale de l'indice moyen « vague de chaleur » (*Heat waves*) (scénario A1B) entre les deux périodes suivantes : 1980-1999 et 2080-2099.
- e) Moyenne mondiale de l'indice « saison de végétation » (*Growing season*) projetée jusqu'en 2100 et pour les scénarii B1, A1B, A2. L'indice « saison de végétation » est défini comme suit : la période (en jours) allant du premier jour du premier épisode de 5 jours consécutifs ayant une température maximale supérieure ou égale à 5 °C jusqu'au dernier jour du dernier épisode de l'année remplissant ces mêmes conditions.
- f) Projection spatiale de la variation de l'indice moyen « saison de végétation » (*Growing season*) (scénario A1B) entre les deux périodes suivantes : 1980-1999 et 2080-2099.

Les lignes colorées des graphes a), c) & e) représentent la moyenne (prise tous les 10 ans et ensuite lissée) des simulations des modèles différents. Les enveloppes autour de ces lignes représentant l'écart type. Pour les graphes b), d) & f), les pointillés indiquent les aires où au moins 5 des 9 modèles concluent vers une variation statistiquement significative. Ces indices « extrêmes » ont été uniquement calculés sur les continents. Les indices « jours de gel » et « saison de végétation » ne sont calculés qu'en dehors des tropiques. Les indices sont calculés selon Frich et al. (2002).

2.5. Variations des précipitations et extrêmes

2.5.1. Au niveau mondial et en Europe

Le risque de sécheresse est susceptible d'augmenter dans le sud et l'Europe centrale (GIEC 2007, AR4). Plusieurs types d'études ont indiqué une diminution du nombre de jours de précipitations (Frei et al., 2006; Räisänen et al., 2004; Semenov & Bengtsson, 2002; Voss et al., 2002) et une augmentation de la durée des plus longs épisodes de sécheresse (Beniston et al., 2007; Gao et al., 2006; Pal & Giorgi, 2004; Tebaldi et al., 2006; Voss et al., 2002). En revanche, les mêmes études ne suggèrent pas de grands changements dans la longueur des ces plus longues périodes sèches dans le nord de l'Europe.

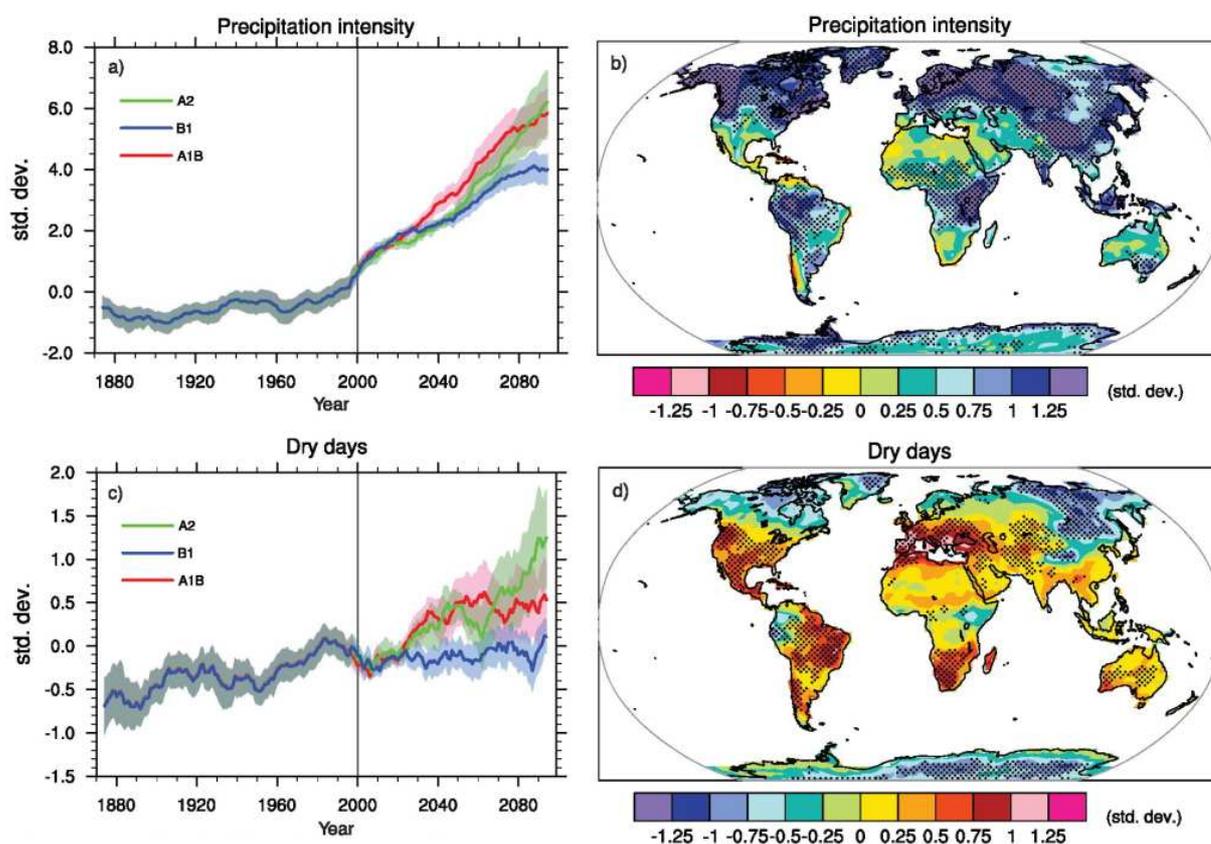


Figure 12 - Evolution des extrêmes basée sur des simulations multi-modèles, adapté de Tebaldi et al. (2006) (GIEC 2007, AR4).

- Moyenne mondiale de l'indice « intensité de précipitation » (*Precipitation intensity*) projetée jusqu'en 2100 et pour les scénarii B1, A1B, A2. L'indice « intensité de précipitation » est définie comme suit : le total des précipitations annuelles divisé par le nombre annuel de jour pluvieux.
- Projection spatiale de la variation de l'indice moyen « intensité de précipitation » (*Precipitation intensity*) (scénario A1B) entre les deux périodes suivantes : 1980-1999 et 2080-2099.
- Moyenne mondiale de l'indice « épisode sec » (*Dry days*) projetée jusqu'en 2100. L'indice « épisode sec » est défini comme suit : le nombre annuel maximum de jours secs consécutifs.
- Projection spatiale de la variation de l'indice moyen « épisode sec » (*Dry days*) (scénario A1B) entre les deux périodes suivantes : 1980-1999 et 2080-2099.

Les lignes colorées des graphes a) et c) représentent la moyenne (prise tous les 10 ans et ensuite lissée) des simulations des modèles différents. Les enveloppes autour de ces lignes représentant l'écart type. Pour les graphes b) et d), les pointillés indiquent les aires où au moins 5 des 9 modèles concluent vers une variation statistiquement significative. Ces indices « extrêmes » ont été uniquement calculés sur les continents et selon Frich et al. (2002).

D'une manière globale, les simulations prévoient une augmentation (projetée jusqu'en 2100) de l'intensité des précipitations (Figure 12). L'augmentation est la plus élevée pour les « hautes » latitudes Nord (entre 0,75 et 1,25 unité écart type dans nos régions). La longueur des épisodes secs augmente également, et particulièrement sous nos latitudes : entre 0,75 et 1,25 unité écart type dans nos régions (Tebaldi et al. (2006)). L'explication des unités est la même qu'à la section 2.4.1.

2.6. Vitesse du vent

Les prédictions quant au régime venteux à prévoir pour 2100 sont moins poussées que les facteurs « température » et « précipitation », mais la confiance en un avenir sans perturbation de ce système reste très mince. Plusieurs modèles prédictifs annoncent une augmentation de la vitesse moyenne et/ou de la vitesse maximale des vents dans le nord et/ou dans le centre de l'Europe (Knippertz et al., 2000; Leckebusch & Ulbrich, 2004; Pryor et al., 2005a; van den Hurk et al., 2006; Zwiers & Kharin, 1998). D'autres modèles ne mettent pas de changement en évidence (Pryor et al., 2005b).

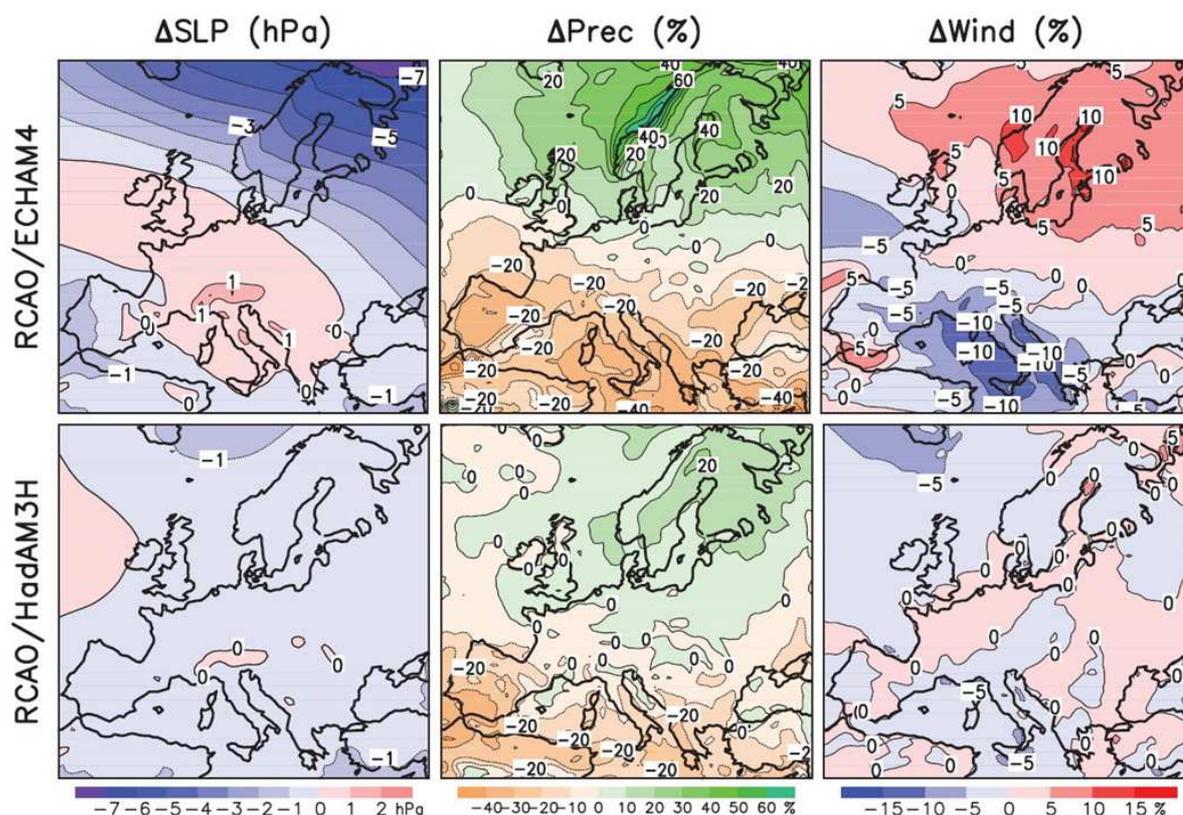


Figure 13 - Simulation de l'évolution de la pression annuelle moyenne au niveau de la mer (Δ SLP), de l'évolution des précipitations moyennes annuelles (Δ Prec) et de l'évolution de la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m au dessus du niveau de la mer (Δ Wind) (GIEC 2007, AR4). Evolution entre les années 1961-1990 et les années 2071-2100. Les résultats sont basés sur le scénario A2 du SRES et ont été produits par le même RCM (Rossby Centre regional Atmosphere-Ocean Model; RCM) utilisant les données de deux modèles globaux: ECHAM4/OPYC3 (en haut) et HadAM3H (en bas) (GIEC 2007, AR4).

Un facteur clef influençant les prévisions reste un éventuel changement dans la circulation atmosphérique, et ce à grande échelle. Des simulations avec augmentation du gradient de pression (partie supérieure de la Figure 13) sur l'axe nord-sud de l'Europe prédisent des vents

plus forts dans le nord de l'Europe. Cause en est le passage vers le nord des activités cycloniques. Ce passage vers le nord tend à réduire la force des vents dans le domaine méditerranéen. Si ce gradient « nord-sud » est moins marqué (partie inférieure de la Figure 13), on remarque des prévisions avec des changements beaucoup moins marqués. En conclusion, même si les simulations du « système vent » sont à interpréter avec plus de précautions encore que les facteurs précédents, le gestionnaire forestier devra se préparer à une augmentation des fortes tempêtes hivernales, tant en fréquence qu'en intensité.

Chapitre 3. Synthèse et conclusion pour la forêt de Soignes

La synthèse des principaux facteurs abordés dans les sections précédentes est reprise dans le Tableau 1. Les données chiffrées fournies ici seront utilisées comme référence pour l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les essences en place dans la forêt de Soignes. Vu l'aspect prédictif des facteurs climatiques, certains facteurs seront exprimés de manière quantitative, d'autres de manière qualitative. La suite de cette partie bibliographie reprend l'éco-physiologie des essences facteur par facteur, afin d'en dégager les plus limitants par rapport aux prévisions abordées dans la partie présente.

Tableau 1 - Synthèse des changements climatiques à prévoir pour l'horizon 2100

	Horizon 2100	Remarques
Température moyenne annuelle	9,1 + 2,5 = 11,6 °C	Si efforts politiques pour diminuer le réchauffement
	9,1 + 3,2 = 12,3 °C	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
Température moy. (juin-juillet-août)	16 + 2 = 18 °C	Si efforts politiques pour diminuer le réchauffement
	16 + 3,9 = 20,1	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
Précipitations		
Précipitations annuelles	-4% (770 à 740 mm)	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
<i>Saison de végétation (avril-octobre)</i>	-15% (470 à 400 mm)	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
<i>En été (juin-juillet-août)</i>	-24% (218 à 166 mm)	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
<i>En hiver (décembre-janvier-février)</i>	+18% (182 à 214 mm)	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
Variations des températures et extrêmes		
<i>Jours de gel</i>	Diminution	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
<i>Vagues de chaleur</i>	Augmentation	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
<i>Saison de végétation</i>	Augmentation	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
Variations des précipitations et extrêmes		
<i>Intensité des précipitations</i>	Augmentation	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
<i>Episodes secs</i>	Augmentation	Prévisions selon le scénario A1B du GIEC
Vitesse du vent		
<i>Intensité</i>	Augmentation	Prévisions selon le scénario A2 du GIEC
<i>Fréquence des tempêtes</i>	Augmentation	Prévisions selon le scénario A2 du GIEC

Si l'on veut aller plus loin que les considérations climatiques, nombre de travaux ont été entrepris sur l'effet de ces changements climatiques sur la distribution des grandes essences forestières. Badeau et al. (Badeau et al., 2004) ont fourni une carte de prévision de la distribution de probabilité de présence du hêtre à l'échelle de la France (Figure 14). Il s'agit d'une carte qui est basée sur un modèle qui met en relation la présence actuelle des essences forestières (renseignées par l'inventaire forestier national français) avec des variables météorologiques (modèle de niche). Le modèle ne prend pas en compte les variables locales (topographie, sol,...) et n'est valable qu'à une échelle régionale. C'est la raison pour laquelle il s'agit d'un modèle de probabilité de présence. Sur base de ce modèle de répartition potentielle et en appliquant le scénario moyen A1B du GIEC, les répartitions potentielles probables sont extraites du modèle pour les dates 2050 et 2100.

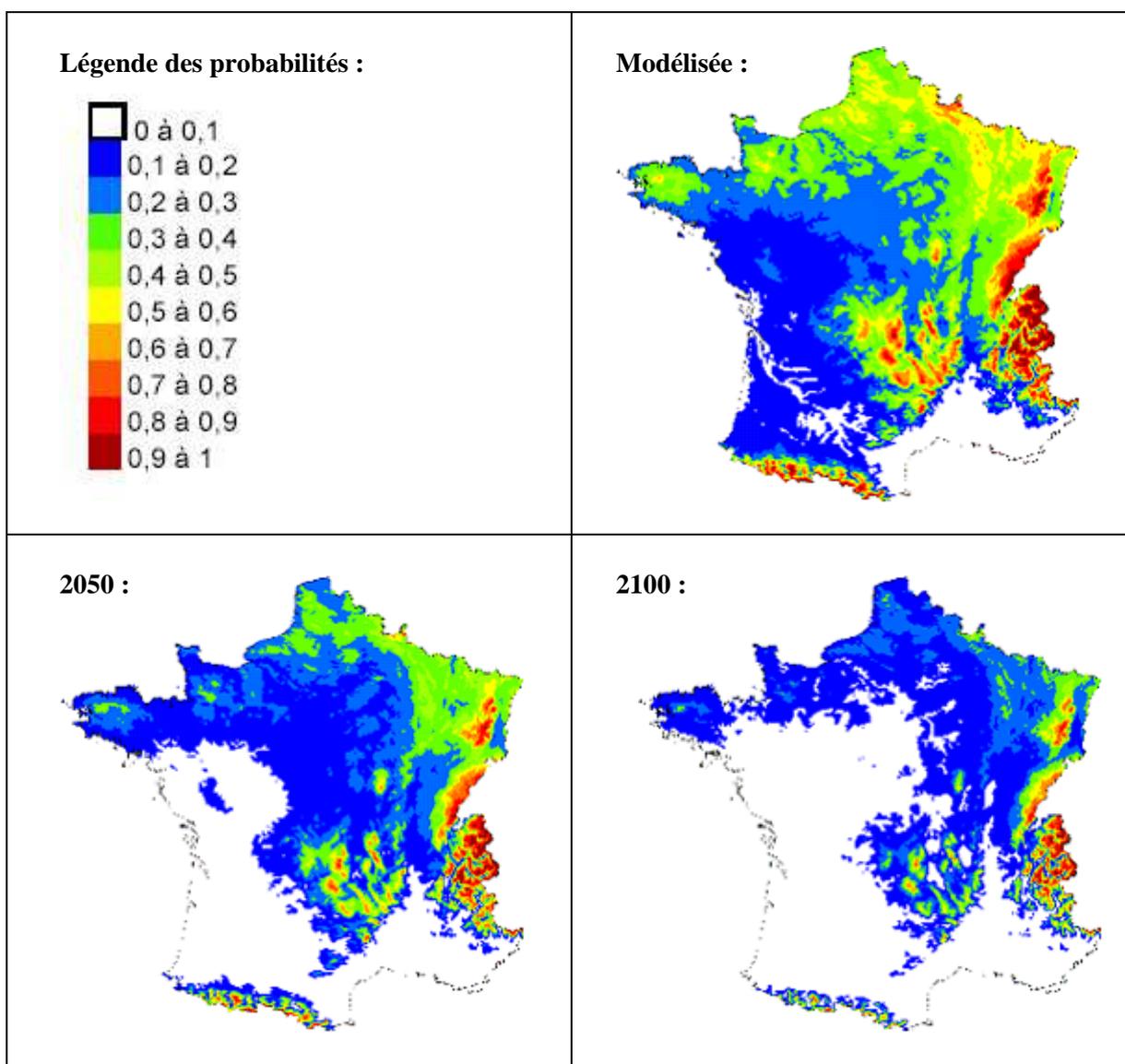


Figure 14 - Cartes de répartition des probabilités de potentialité de présence du hêtre (*Fagus sylvatica*) sur le territoire français, et ce modélisée selon le scénario A1B pour les années 2000, 2050 et 2100 (source: Badeau et al. 2004).

Ces cartes interpellent immédiatement : on ne peut éviter d'étendre le résultat du Nord, très proche de la Forêt de Soignes, ou de projeter le climat futur de la Forêt de Soignes dans

l'actuel climat de la France. En effet, les pluviosités et températures mensuelles moyennes de la région de Nantes (Loire atlantique) correspondent aux prévisions attendues pour 2100 en forêt de Soignes (Figure 15). Selon le modèle, cette région se situe actuellement dans une zone à faible probabilité de présence potentielle de l'espèce (entre 0,1 et 0,2).

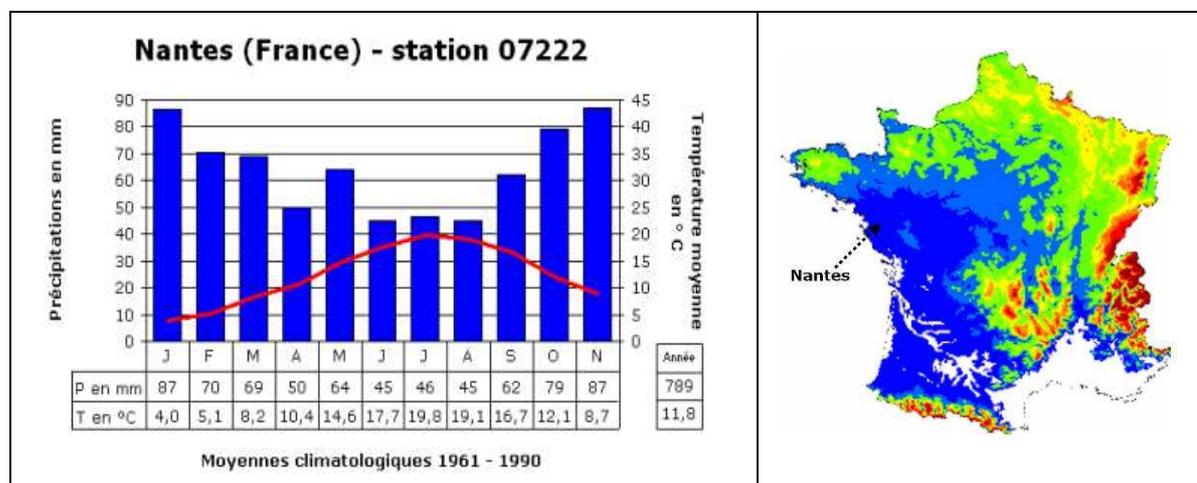


Figure 15 - Climatogramme de la station de Nantes, moyennes climatologiques calculées sur la période 1961 – 1990 (source : site IRM, www.meteo.be)

Soulignons toutefois le danger de comparer trop rapidement ces deux régions (Nantes 2000 et Soignes 2100) par rapport à des potentialités d'accueil comparables pour le hêtre. Une multitude d'autres facteurs sont entendu à considérer, tels que la pédologie, l'humidité atmosphérique, topographie, etc. Cette comparaison a toutefois le mérite de soulever l'interrogation d'une comparaison stationnelle plus poussée entre ces deux régions.

Par rapport à celle de Badeau et al. (2004), la présente étude vise à apporter une précision stationnelle par l'intermédiaire d'un catalogue des stations. Pour cela, d'autres facteurs sont à intégrer en parallèle aux facteurs climatiques : exposition, type de sol, hydromorphie et/ou réserve utile du sol, etc. Les études actuelles se dirigent en ce sens : modélisation d'apports hydriques d'un massif forestier, etc. En l'état actuel de la recherche et l'échelle de la forêt de Soignes, c'est d'un avis d'expert de détecter quels sont les points faibles des différentes essences face à aux changements climatiques. En ce sens, la partie suivante fait le point sur les différentes avancées en connaissances de l'auto-écologie du hêtre et des chênes pédonculé et sessile.

Partie 2 – Autécologie des essences potentielles de production de la Forêt de Soignes

Chapitre 4. Eco-physiologie du hêtre et des chênes sessile et pédonculé

Sur base de la littérature, cette partie analyse donc les réactions physiologiques du hêtre et des deux chênes face à la variation des facteurs environnementaux. En ce sens, la notion de dépérissement et donc les études s’y rapportant sont également essentielles à la compréhension du problème. Une partie plus générale aborde donc ce phénomène de dépérissement. Dans un souci de clarté, une synthèse pour chaque facteur est ventilée par essence et une synthèse générale est également présentée.

4.1. Dépérissement : généralités

Face à une vision de perfection de la production forestière, on pourrait avoir tendance à stigmatiser ce phénomène de dépérissement. Rappelons qu’il s’agit d’un phénomène « fréquent » auquel ont toujours été confrontés les milieux forestiers, et ce à différentes échelles : échelle géologique avec les glaciations, échelle plus historique avec des changements climatiques naturels, ... A cela s’ajoute maintenant la composante anthropique.

Il n’existe pas une cause à un dépérissement, mais bien de multiples causes (Bonneau, 1994). Quelques exemples d’interactions possibles :

- génétique x climat x conditions stationnelles ;
- pollution atmosphérique x climat x fertilité minérale
- climat x attaque parasitaire.

Face à de multiples causes, une hiérarchisation de celles-ci est nécessaire (Bonneau, 1994):

- Facteurs prédisposants : facteurs présents depuis un temps certain sans toutefois diminuer la santé des arbres. Les arbres sont soumis à un stress qui peut être permanent, mais ne provoquant qu’une baisse relative de la productivité. *Conditions stationnelles, génétique, ...*
- Facteurs déclenchants : intervenant brusquement et avec intensité. Les effets ne sont pas toujours observables sur le moment même. Ils sont aggravés par les éventuels facteurs prédisposant existants. *Aléas climatiques, pollutions atmosphériques, ...*
- Facteurs aggravants : ils amplifient les facteurs déclenchants. La combinaison résultante va jusqu’à la mort de l’arbre, voire à plus grande échelle une perte conséquente dans le peuplement. *Monospécificité du peuplement, attaque parasitaire, tempête, ...*

Toutefois, la différenciation en facteur prédisposant, déclenchant et aggravant n’est pas toujours aisée. Cela dépend de la sensibilité de chacun, des arguments mis en avant. L’estimation de leur importance relative dans le dépérissement proprement dit peut également poser problème : des dispositifs expérimentaux mettant en scène l’isolement de tel ou tel facteur sont difficile à mettre en place (échelle « miniature », conditions artificielles à contrôler). La spirale de Manion illustre les facteurs intervenant dans un dépérissement

(Figure 16) et suggère ainsi la complexité des rôles et contributions respectives de ces facteurs (Manion, 1981) in (Focant & Malaisse, 2001).

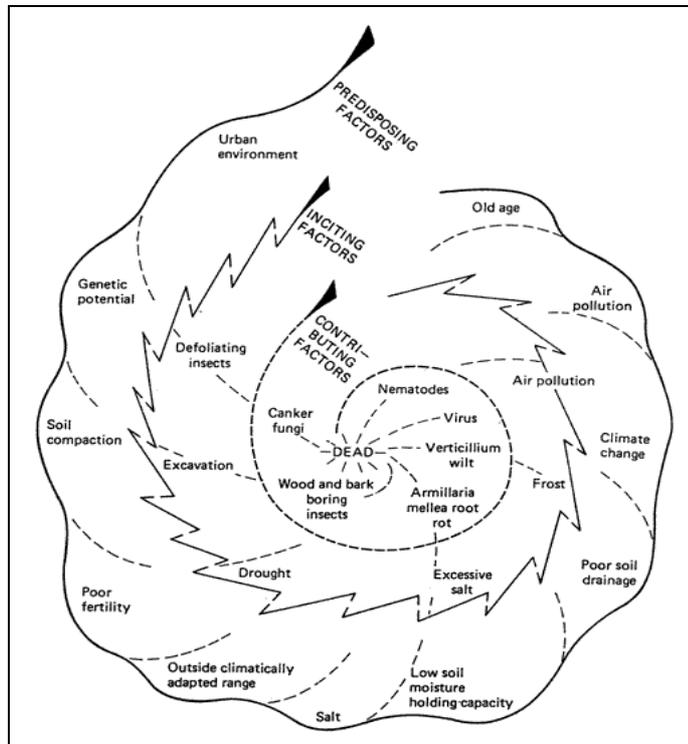


Figure 16 - Spirale de Manion, reprenant les facteurs intervenant dans le dépérissement (extrait de Manion 1981)

Pour résumer, on pourrait dire que « *un ou plusieurs facteurs déclenchants favorisent l'installation de facteurs aggravants, d'autant plus facilement que le peuplement est soumis à l'action de facteurs prédisposants* » (Nageleisen, 1994). On peut d'ailleurs considérer que, dans un premier temps, les modifications climatiques vont surtout amener des dépérissements pour les plantations installées en relative inadéquation avec leur station, ce qui les prédispose au dépérissement.

Synthèse pour le hêtre et les chênes

En ce qui concerne le hêtre, distinction est à faire entre la maladie du hêtre et son dépérissement. La maladie du hêtre a pour cause un événement climatique brutal et limité dans le temps et dans l'espace : exemple de l'Ardenne belge (Huart et al., 2003; Reuter, 2005), tandis que son dépérissement dépend de causes plus complexes ; il s'observe tant en Ardenne qu'en forêt de Soignes. Différents facteurs déclenchants sont à mettre en exergue, voici ceux considérés comme les plus préjudiciables (Nageleisen & Huart, 2005): sécheresse, printemps pluvieux provoquant des engorgements durables, tassement des sols. Dans certains sols ardennais, l'hypothèse d'une carence magnésienne a aussi été défendue (Weissen *et al.*, 1992).

Pour les chênes, divers constats ont été mis en évidence en Région Wallonne :

- Le niveau de dépérissement est plus élevé en altitude, le niveau de 380 mètres étant identifié comme une limite. Cette limite n'intervient pas dans la zone d'étude qui nous occupe (Gillet et al., 2007).
- Le dépérissement est moins marqué pour des sols bien frais, correspondant à l'optimum de l'espèce au niveau hydrique (codification 0 ou -1 dans le guide du boisement) (Gillet et al., 2007). Les épisodes secs, tout comme pour le hêtre, sont des facteurs déclencheurs à un dépérissement du chêne (Dulière & Malaisse, 1995; Giot & Malaisse, 1997).
- Surtout pour le chêne sessile, le niveau de dépérissement va de manière croissante des sols plus fertiles (humus de type mull) sols pauvres (humus de type dysmoder) vers les (Gillet et al., 2007). La pauvreté du sol et/ou un déséquilibre nutritionnel sont reconnus comme facteurs prédisposants dans le dépérissement des chênes (Etienne, 2001; Giot & Malaisse, 1997).

4.2. Température

4.2.1. La chaleur

4.2.1.1. *Influence sur la phénologie*

Comme expliqué en première partie, on s'attend à un allongement de la période de végétation, calculée sur l'évolution des températures journalières.

Par imagerie satellite, il a été mis en évidence une avance de 8 jours dans le débourrement de la végétation forestière entre 1981 et 1996, dans les latitudes nord (Delbart et al., 2008).

Menzel et al. (Menzel et al., 2006), à partir d'une base de données reprenant 125.000 séries d'observations, évaluent un avancement moyen de la reprise de croissance de 2,5 jours par décennie.

Face à une augmentation déjà effective de la température, Kramer (Kramer, 1995) met en évidence une diminution de la période de croissance pour le chêne pédonculé, cause en est la chute des feuilles plus précoce combinée à une plus faible précocité du débournement. Pour le hêtre, le stade chute des feuilles ne semble pas avoir changé, mais le débournement est plus précoce, ce qui peut poser problème face à d'éventuelles gelées tardives (voir section 4.2.2.1).

4.2.1.2. *Température moyenne optimale*

Si l'on s'intéresse à la température moyenne annuelle, le Tableau 2 reprend les exigences du hêtre et des deux chênes, et ce quand l'information est disponible, en situation optimale et tolérée.

Tableau 2 - Température moyenne annuelle et température moyenne estivale pour le hêtre et les chênes pédonculé et sessile (source : Masson 2005)

	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Quercus petraea</i>
Température moyenne annuelle optimale	7 - 10 °C	8 - 12 °C	8 - 12 °C
Température moyenne annuelle tolérée	3 - 12 °C	jusqu'à 13,5 °C	jusqu'à 15°C
Température moyenne annuelle exclue	exclusion pour 15°C		
Température moyenne estivale	sensible aux vagues de chaleur	juillet 14- 25 °C	peu sensible à la chaleur

Point de vue croissance, une étude danoise s'est attelée à étudier des plants de hêtre sous 4 régimes différents de température (Bruhn et al., 2000; Leverenz et al., 1999; Saxe et al., 2001). Les résultats simplifiés sont observables au Tableau 3. Pour une augmentation de 2,3°C, une augmentation en hauteur et en matière sèche est observée. Pour une augmentation de 4,8 °C, l'augmentation de hauteur se stabilise et on observe une perte de 23% de matière sèche par rapport à la situation température ambiante.

Tableau 3 - Réponse de croissance de plants de hêtre à 4 régimes différents de température; la matière sèche reprend racines, tiges et feuilles (source: Saxe et al. 2001)

<i>Fagus sylvatica</i>	2,8°C en-dessous	Température ambiante	2,3°C au-dessus	4,8°C au-dessus
Variation hauteur	-15%	ref: 312mm	+10%	+12%
Variation diamètre	ns	ref: 10,5mm	ns	ns
Variation matière sèche	+22%	ref: 5609mg	+12%	-23%

Les mesures ont été réalisées sur la période juin-septembre et si l'on compare les climatogrammes de Copenhague et Uccle (Figure 17), on observe une différence d'en moyenne 0,75°C entre ces deux régions. Si l'on ose la simplification de transformer + 4,8°C en + 4°C, on se rapproche des prévisions d'augmentation de température dans nos contrées.

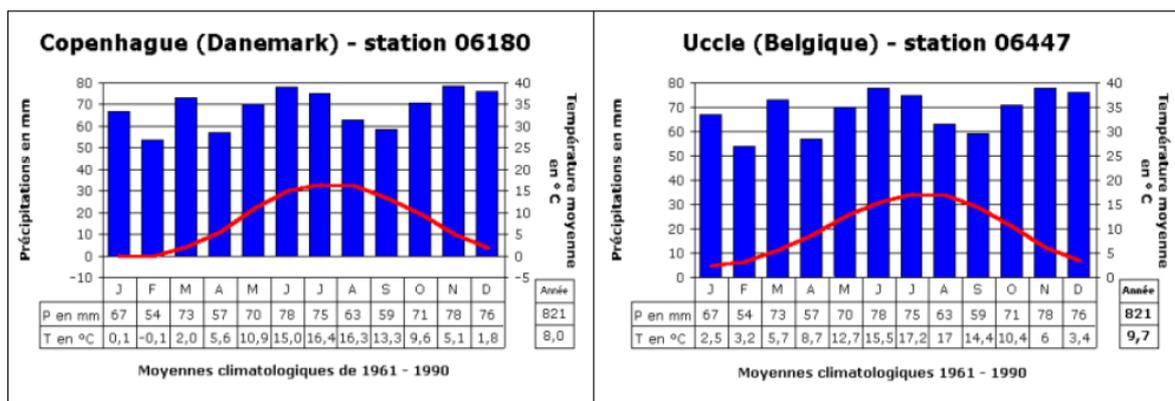


Figure 17 - Climatogrammes des stations de Copenhague et d'Uccle, moyennes climatologiques calculées sur la période 1961 – 1990 (source : site IRM, www.meteo.be)

Mais si la température peut jouer un rôle stimulant dans la croissance des arbres, il faut aussi que les disponibilités en eau et en éléments chimiques suivent également. D'autre part, cette réaction de gain de croissance (expériences réalisées sur des jeunes plants, rappelons le) peut en réalité ne refléter qu'une réponse initiale, avec un déclin à long terme (Olszyk et al., 1998).

4.2.1.3. *Vagues de chaleur*

La température maximum critique est estimée à +41°C pour le hêtre, +45°C pour le chêne sessile et +45°C pour le chêne pédonculé (Weissen et al., 1991).

Pour le hêtre, nous n'avons pas trouvé de référence seule à la température. Les grandes chaleurs sèches sont considérées comme facteur principal de dépérissement d'individus situés en conditions limites. Pendant la période estivale, le chêne pédonculé apprécie une chaleur relativement élevée. Les moyennes pour le mois de juillet comprises entre + 14°C et + 25°C sont citées par le CTGREF (Masson, 2005). Quant au chêne sessile, idem, il résiste bien à une chaleur assez élevée en été.

4.2.2. Le froid

Facteur limitant important des milieux forestiers, le froid peut provoquer des perturbations physiologiques sur différentes phases d'activités : débourrement, croissance, floraison, fructification, germination. Plus radical encore, les extrêmes de froid peuvent entraîner la mort d'une partie ou de la totalité d'un arbre. Trois périodes doivent être prises en compte de ce point de vue : printemps, automne et hiver.

4.2.2.1. *Printemps*

4.2.2.1.1. *Généralités*

Le risque est de voir un débourrement et une mise à fleur plus précoce, augmentant ainsi le risque de gelées « tardives » dommageable à cette reprise d'activité. La sensibilité des bourgeons lors du débourrement avoisine la température de - 4°C. La floraison est perturbée quant à elle pour des températures oscillant entre - 2°C et - 3°C (Aussenac & Guehl, 1994). Ces gelées tardives n'interviennent significativement que lorsque leur fréquence inter annuelle est élevée, compromettant également la feuillaison et la croissance.

4.2.2.1.2. *Fichier écologique des essences*

Ces dégâts dus aux gelées tardives affectent de manière significative le développement et la croissance de certaines espèces (Tableau 4 ; ces espèces ont été choisies en fonction de leur potentialité sylvicole au sein de la zone d'étude).

4.2.2.1.3. *Données éco-physiologiques*

Une étude sur des jeunes plants de chênes sessiles a déterminé que l'intensité des dégâts dus aux gelées tardives était maximum lorsque que le plant se trouvait au stade élancement de la pousse. Cependant, si les gelées surviennent après cette 1^{ère} vague d'élancement (entre la 1^{ère} et la 2^{ème} vague), les dégâts observés sont moins importants (Chaar & Colin, 1999).

Pour le hêtre, le risque de ces gelées tardives réside également dans l'augmentation du risque d'apparition de fourches, nuisant ainsi à la formation d'une grume de qualité. Déjà admis en gestion forestière, cette problématique a été étudiée quantitativement par Nigre et Colin (Nigre & Colin, 2007). Ils ont constaté (sur des hêtres âgés de 17 ans) une très haute dépendance de la fourchaison avec la hauteur des plants. Les plants de moins de 4 mètres

étaient largement touchés, ceux dépassant la hauteur de 7 mètres étaient indemnes. Cela n'est sans doute pas sans rapport avec la stagnation et l'accumulation du froid au niveau du sol.

Une étude de 1994, avec comme aire d'application les Pays-Bas et l'Allemagne, conclut à une diminution du risque de gelées tardives malgré un avancement du débourrement, et ce pour le hêtre et les deux chênes (Kramer, 1994). La composante climatique semble moins contraignante que la réaction physiologique des arbres : plus grande diminution du risque de gelée tardive par rapport à l'avancement du débourrement.

Tableau 4 - Sensibilité des essences face aux gelées tardives (PS: peu sensible, S: sensible, TS: très sensible); tiré du fichier écologique des essences (Baix et al. 1991)

Feuillus			Résineux		
<i>Fagus sylvatica</i>	Juvenile	TS	<i>Larix decidua</i>	Juvenile	TS
	Adulte	S		Adulte	S
<i>Quercus petraea</i>	Juvenile	S	<i>Larix kaempferi</i>	Juvenile	TS
	Adulte	PS		Adulte	TS
<i>Quercus robur</i>	Juvenile	PS	<i>Larix X eurolepis</i>	Juvenile	PS
	Adulte	S		Adulte	PS
<i>Quercus rubra</i>	Juvenile	S	<i>Pinus sylvestris</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (laricio)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Fraxinus excelsior</i>	Juvenile	S	<i>Pinus nigra (nigra)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	S		Adulte	PS
<i>Carpinus betulus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (koekelare)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Prunus avium</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			
<i>Betula pendula</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			

4.2.2.1.4. Perspective

Ce facteur reste difficile à estimer. En effet, simuler l'effet d'un réchauffement hivernal relatif sur le développement est plus aisé que de prévoir la fréquence et l'importance d'apparition de gelées tardives. Plusieurs facteurs régissent l'apparition de ces gelées : géographie, caractéristiques des masses d'air, bilan radiatif nocturne, le vent, la position topographique. Le risque de ces « futures » gelées tardives reste moindre en forêt de Soignes qu'actuellement en Ardenne.

En outre, les gelées tardives, si elles ne sont pas systématiques et répétées, ne constituent pas le facteur le plus limitant. Elles peuvent toutefois affecter les régénérations en trouées ou mises à blanc, mais également la forme des jeunes arbres.

4.2.2.2. Automne

Influence au moment de l'aouêtement. Les gelées d'automne sont moins dommageables que les gelées tardives car les essences sont généralement correctement aouêtées lors des premières gelées. Celles-ci touchent principalement des essences exotiques à longue période de végétation (Aussenac & Guehl, 1994) Tableau 5. D'autre part, il semblerait que l'allongement de cette période de végétation concerne moins l'automne que le printemps.

Tableau 5 - Sensibilité des essences face aux gelées précoces (PS: peu sensible, S: sensible, TS: très sensible); tiré du fichier écologique des essences (Baix et al. 1991)

Feuillus			Résineux		
<i>Fagus sylvatica</i>	Juvenile	PS	<i>Larix decidua</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Quercus petraea</i>	Juvenile	PS	<i>Larix kaempferi</i>	Juvenile	S
	Adulte	PS		Adulte	S
<i>Quercus robur</i>	Juvenile	PS	<i>Larix X eurolepis</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Quercus rubra</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (laricio)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Fraxinus excelsior</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (nigra)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Carpinus betulus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (koekelare)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Prunus avium</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Juvenile	TS			
	Adulte	TS			
<i>Betula pendula</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			

4.2.2.3. Hiver

Les conséquences de températures extrêmement basses sont de deux types.

Premièrement, une variation brutale de la température à l'échelle des jours peut survenir en hiver mais surtout dangereuse en automne. En effet, la tolérance des tissus végétaux varie au cours de l'année. Une résistance au froid s'installe relativement rapidement lors des premiers froids d'automne. Par contre, des froids abruptes (s'installant en quelques jours) et intenses endommageront des arbres encore insuffisamment endurcis (Aussenac & Guehl, 1994). Ce fût le cas avec la maladie du hêtre qui eut son origine dans un coup de froid automnal (seulement -16°C) sans refroidissement progressif préalable.

Deuxièmement, face à un froid très intense, la résistance au froid varie avec les essences. Quelques essences sont reprises dans le Tableau 6 (Larcher, 1975)in(Aussenac & Guehl, 1994). Le chiffre de -30°C est également cité par Timbal & Aussenac (Timbal & Aussenac, 1996).

L'évolution du risque dans le cadre des changements climatiques n'est pas clairement établie.

Tableau 6 - Exemples de température minima occasionnant en hiver des débuts de dégâts (nécroses) chez quelques feuillus et résineux (tiré de Larcher 1975 in Aussenac et Guehl 1994)

Feuillus	Température minima (°C)
<i>Fagus sylvatica</i>	-30
<i>Quercus petraea</i>	-30
<i>Quercus robur</i>	-30
<i>Acer pseudoplatanus</i>	-30
<i>Betula pendula</i>	-40
Résineux	Température minima (°C)
<i>Pinus sylvestris</i>	-40
<i>Pinus nigra</i>	-40

4.3. Régime hydrique

4.3.1. Régime hydrique annuel

D'un point de vue général, le Tableau 7 renseigne les exigences minimales ainsi que l'optimum des précipitations moyennes annuelles (en mm), mais également l'hygrométrie optimale pour le hêtre et les deux chênes. Les données de précipitations sont fournies par Masson (Masson, 2005) mais sans une correspondance de température. Les chiffres de pluviosités moyennes annuelles minimales sont donc à prendre avec des pincettes, valables exclusivement dans un contexte de température moyenne annuelle optimum à l'espèce. En effet, si l'on considère l'exemple de la présence du chêne pédonculé dans les Pyrénées (donc en altitude), 1500 mm de précipitations annuelles moyennes représentent le minimum car la température moyenne annuelle y est de 12,5 °C.

Tableau 7 - Pluviométrie et hygrométrie pour le hêtre et les chênes pédonculé et sessile (source: Masson 2005)

	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Quercus petraea</i>
Pluviométrie moyenne annuelle minimale	750 mm (T°opt.)	600 mm (T°opt.)	600 mm (T°opt.)
Pluviométrie moyenne annuelle optimale	jusqu'à 2000 mm	1200 mm (bien réparti)	
Hygrométrie optimale	85%	80%	80%
Sensibilité à la sécheresse atmosphérique	très sensible	sensible	peu sensible

Pour le hêtre la pluviométrie moyenne annuelle peut descendre jusqu'à 600 mm sous conditions particulières : humidité ambiante importante et/ou bonne alimentation en eau du sol lié à des conditions édaphiques et surtout topographiques particulières. Rappelons également qu'une abondance de brouillard est favorable au hêtre (espèce montagnarde).

Une manière plus complète et cohérente d'aborder ce facteur régime hydrique serait de le coupler avec le régime des températures. La

Figure 18 et Figure 19 reprennent ces couples pour le hêtre, et ce pour les différents territoires écologiques de Wallonie (Weissen & al. 1991) et différentes régions françaises (Teissier du Gros & al. 1981). Si l'on compare aux prévisions de températures et de précipitations retenues pour 2100 en FS, le couple « 740 mm ; 12,3 °C » n'est pas représenté dans le diagramme de la Wallonie, ni même dans le diagramme français qui contient l'amplitude écologique du hêtre (en tout cas, sa limite xérique).

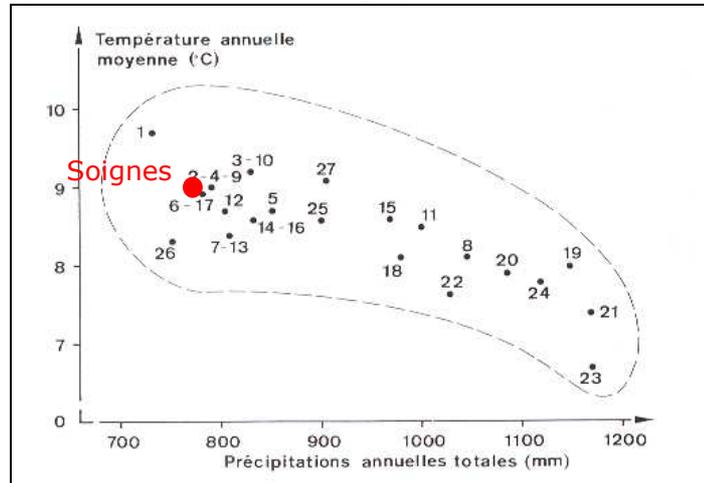


Figure 18 – Couples « température annuelle moyenne (T.a.) – précipitations annuelles (Pr.a.) » pour le hêtre et représentatifs des conditions climatiques actuelles en Wallonie (tiré de Weissen & al. 1991). Les territoires écologiques représentés par des numéros dans le présent graphe sont détaillés à l'annexe 1

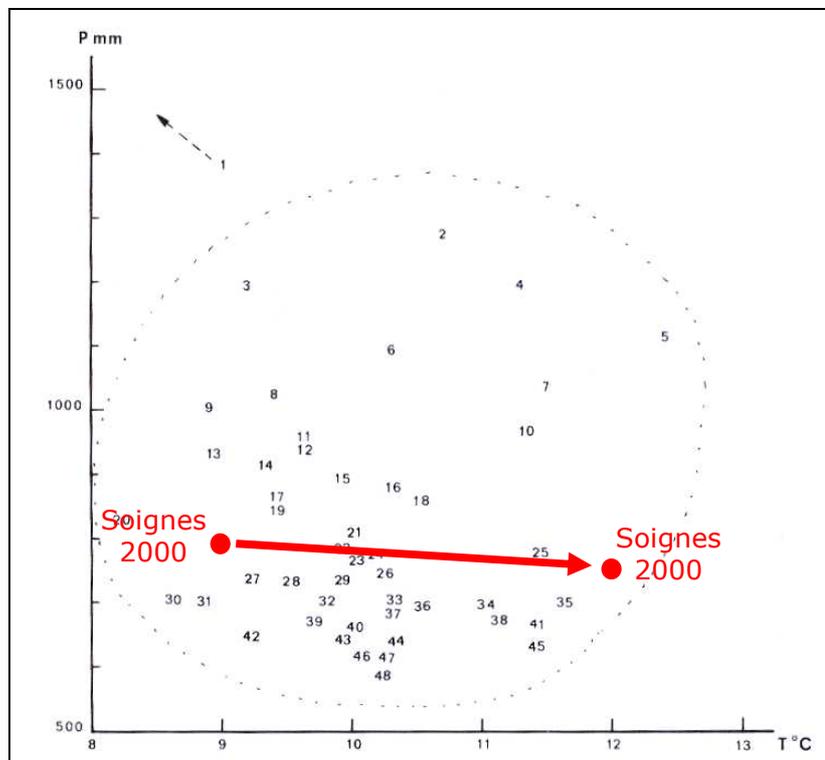


Figure 19 - Couples « précipitations annuelles (P en mm) - température annuelle moyenne (T en °C) » pour le hêtre de basse altitude et représentatifs des conditions climatiques en France (tiré de Teissier du Gros & al. 1981). Les territoires écologiques représentés par des numéros dans le présent graphe sont détaillés à l'annexe 1

Cette situation se rapproche des régions suivantes : Pontivy (25), Millau (35), Poitiers (41), Angers (45), Rennes (34), Le Mans (38) (Figure 20) qui ne sont pas représentées dans les stations de la hêtraie en France.



Figure 20 - Localisation sur la carte de France des villes suivantes : Pontivy, Millau, Poitiers, Angers, Rennes, Le Mans.

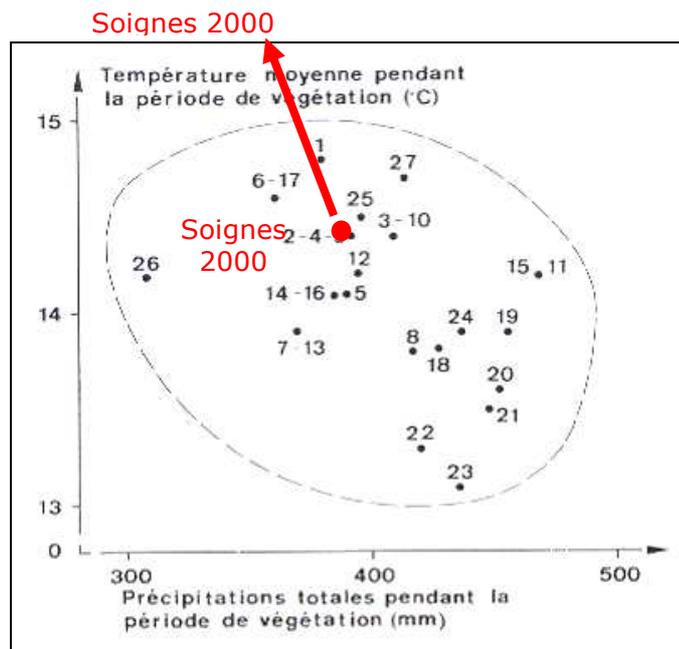


Figure 21 - Couples « température moyenne pendant la période de végétation (T.v.) – précipitations pendant la période de végétation (Pr.v.) » pour le hêtre et représentatifs des conditions climatiques actuelles en Wallonie (tiré de Weissen & al. 1991).

De surcroît, les précipitations et températures devraient être plus logiquement abordées plutôt sur la période de végétation (avril à octobre), telles qu'illustrées à la Figure 21, d'autant plus que les simulations des changements climatiques en ce qui concerne le régime des précipitations prévoient des modifications non homogènes au fil des saisons, caractérisées par un réchauffement accentué en été avec des précipitations diminuées. Malheureusement, dans la littérature, nous n'avons pas trouvé suffisamment d'information sous cette forme. C'est une voie à approfondir, mais en première approche, l'information disponible est suffisamment claire pour supporter notre approche empirique.

4.3.2. Situation de sécheresse

4.3.2.1. Généralités

La sécheresse reste l'autre facteur décisif dans la survie des végétaux. Différents auteurs mettent en cause les années de grande sécheresse comme facteur déclenchant un dépérissement (André & Laudelout, 1992; Desprez-Loustau et al., 2006; Etienne, 2001; Siwkcki & Ufnalski, 1998; van Mantgem & Stephenson, 2007). Ces épisodes de sécheresse sont d'autant plus néfastes que la réserve en eau disponible pour les arbres (combinant réserve en eau utile et volume exploré par le système racinaire) est faible. D'autres facteurs aggravants accompagnent celle-ci : hautes températures, vent, faible humidité atmosphérique. Plus précisément, ce sont les déficits hydriques de longue durée qui provoquent un dépérissement de l'arbre, jusqu'à sa mort. Depuis une trentaine d'années, les différentes années à chaleur estivale intense sont les suivantes (Nageleisen, 1994): 1973, 1976, 1982-83-84, 1989-90-91-(92). Plus récemment, les années 2003, 2004 et 2005 se sont ajoutées à la liste.

Sans entrer dans les détails, quelques hypothèses permettant d'expliquer de quelles manières le stress hydrique est un déclencheur de dépérissement (Etienne, 2001):

- blocage de synthèse de protéine, provoquant une accumulation d'acides aminés stimulant des champignons pathogènes ;
- diminution de la concentration en composés inhibiteurs au développement d'organismes pathogènes ;
- consommation de sucres pour l'osmorégulation, d'où diminution de la disponibilité en réserves énergétiques pour les cellules;
- d'une manière générale, nombreux microorganismes endophytes se situeraient dans l'aubier et profiteraient d'un stress hydrique pour se développer ;
- lésions au système racinaire, provoquant l'entrée de pathogènes ;
- phénomène de cavitation et d'embolie du xylème.

4.3.2.2. Fichier écologique des essences

Le Tableau 8 reprend la sensibilité des essences face à ce phénomène de sécheresse prolongée.

Tableau 8 - Sensibilité des essences face à la sécheresse (PS: peu sensible, S: sensible, TS: très sensible); tiré du fichier écologique des essences (Baix et al. 1991)

Feuillus			Résineux		
<i>Fagus sylvatica</i>	Juvenile	TS	<i>Larix decidua</i>	Juvenile	PS
	Adulte	TS		Adulte	PS
<i>Quercus petraea</i>	Juvenile	PS	<i>Larix kaempferi</i>	Juvenile	TS
	Adulte	PS		Adulte	TS
<i>Quercus robur</i>	Juvenile	S	<i>Larix X eurolepis</i>	Juvenile	S
	Adulte	S		Adulte	S
<i>Quercus rubra</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Juvenile	S	<i>Pinus nigra (laricio)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Fraxinus excelsior</i>	Juvenile	S	<i>Pinus nigra (nigra)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	S		Adulte	PS
<i>Carpinus betulus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (koekelare)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Prunus avium</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	S			
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			
<i>Betula pendula</i>	Juvenile	S			
	Adulte	S			

4.3.2.3. Quelques données éco-physiologiques

4.3.2.3.1. Potentiel hydrique

Forme de résistance à la sécheresse, le potentiel hydrique à perte de turgescence varie en fonction des espèces. Dreyer et al. (Dreyer et al., 1990) renseigne les valeurs du potentiel osmotique à pleine turgescence (π_0) et du potentiel hydrique à perte de turgescence (ψ_{pt}) pour les chênes européens : $\pi_0 = -1,46$ MPa et $\psi_{pt} = -2,24$ MPa pour des jeunes plants de chêne pédonculé ; $\pi_0 = -1,45$ MPa et $\psi_{pt} = -2,24$ MPa pour de jeunes plants de chêne sessile ; $\pi_0 = -2,26$ MPa et $\psi_{pt} = -3,04$ MPa pour des tiges adultes de chêne pédonculé.

Pour les chênes pédonculés et sessiles, la littérature renseigne une fermeture complète des stomates pour des potentiels hydriques variant de -1.8 à -2.0 MPa (Bréda et al., 1993a; Epron & Dreyer, 1993; Timbal & Aussenac, 1996). Il est admis que le chêne pédonculé présente une résistance moindre (par rapport au chêne sessile) au phénomène de cavitation et d'embolie du xylème (Cochard et al., 1992; Vivin et al., 1993).

Plus récemment, Bréda et al (Bréda et al., 2006) renseignent la vulnérabilité au phénomène de cavitation, estimé lorsque la tension du xylème atteint une perte de 50% du potentiel hydrique (ψ_{50}) : -2,25 MPa pour le hêtre, -2,50 MPa pour le chêne pédonculé, -2,70 MPa pour le chêne sessile.

Deux remarques à développer. Premièrement, la variabilité interspécifique peut se révéler plus faible que la variabilité intraspécifique. Deuxièmement, les différences entre essences dans la capacité des tissus foliaires à tolérer un dessèchement permettent de différencier des espèces plus tolérantes ou non. Cependant, ces différences ne peuvent pas servir de critère

unique de différenciation, les mesures très proches entre chêne sessile et pédonculé appuyant ce point de vue.

Face à une embolie du xylème, des phénomènes de « réhabilitation » du xylème existent, plus efficaces chez le chêne, mais sont encore peu étudiés. On sait cependant que ces phénomènes sont coûteux en énergie et une « stratégie » évitant l'embolie pendant une sécheresse est préférable. La vulnérabilité à la cavitation ne suffit bien entendu pas à expliquer une sensibilité à la sécheresse. D'autres stratégies entrent également en jeu, dont le contrôle stomatique et le développement racinaire.

4.3.2.3.2. Contrôle stomatique

Face à une sécheresse, il existe une limitation hydraulique interne qui induit une fermeture des stomates, prévenant ainsi un « emballement » du phénomène d'embolisme (Cruiziat et al., 2002). Cochard et al. (Cochard et al., 1996) ont mis en évidence chez le chêne sessile une nette diminution de la conductance hydraulique (gL), alors que le potentiel hydrique de base (Ψ_{predawn}) reste élevé et constant. Par la suite, Ψ_{midday} est resté constant et au-dessus du potentiel induisant une cavitation, la densité de flux de sève (dF_{midday}) se réduisant de manière importante. Il est proposé que *Quercus petraea* ajuste progressivement ses pertes d'eau afin de maintenir un potentiel au-dessus du seuil de cavitation. En l'absence d'une telle régulation, on assisterait à une mortalité importante des branches du au phénomène d'emballement de l'embolie.

Triboulot et al. (Triboulot et al., 1996) ont tenté de mettre en évidence l'existence d'un signal racinaire sous la forme d'un transport d'une substance des racines vers les couronnes, sans résultat concluant.

4.3.2.3.3. Développement racinaire

La plasticité dans la longueur des racines est considérée comme un aspect important de la résistance à la sécheresse des essences (Reader et al., 1993). Pour les juvéniles et en situation de sécheresse, l'allocation de matière sèche n'accroît pas le diamètre des racines fines dans le cas du hêtre (van Hees, 1997). Pour le chêne pédonculé, un dessèchement doublé d'une exposition à la lumière entraîne une moindre allocation de matière sèche aux tiges et branches, mais plus aux racines de diamètre inférieur à 2mm.

Le système racinaire du chêne peut se développer très profondément, puisant ainsi ses besoins en eau dans les réserves en profondeur (Bréda et al., 1995; Lucot & Bruckert, 1992). Lucot et Bruckert (Lucot & Bruckert, 1992) divise l'enracinement du chêne pédonculé en trois modalités (situation édaphique non contraignante) :

- Enracinement dense de surface, se limitant à une profondeur inférieure à 60cm.
- Enracinement profond intensif, entre 60 et 120cm de profondeur ; le volume de prospection estimé est de 17 m³.
- Enracinement profond extensif, en dessous de 120cm de profondeur, composé principalement de racines pivots. Le volume de prospection est estimé à 800m³.

Hors facteur profondeur du sol, ces différents développements racinaires peuvent toutefois être limités par deux caractéristiques du sol : compacité et anaérobiose, dont l'impact dépend aussi des essences. Ces facteurs locaux modulent ainsi l'impact de la sécheresse sur les essences.

La Figure 22 reprend l'organisation racinaire, et donc l'architecture, du hêtre et du chêne pédonculé en situation édaphique non contraignante (Drénou et al., 2006).

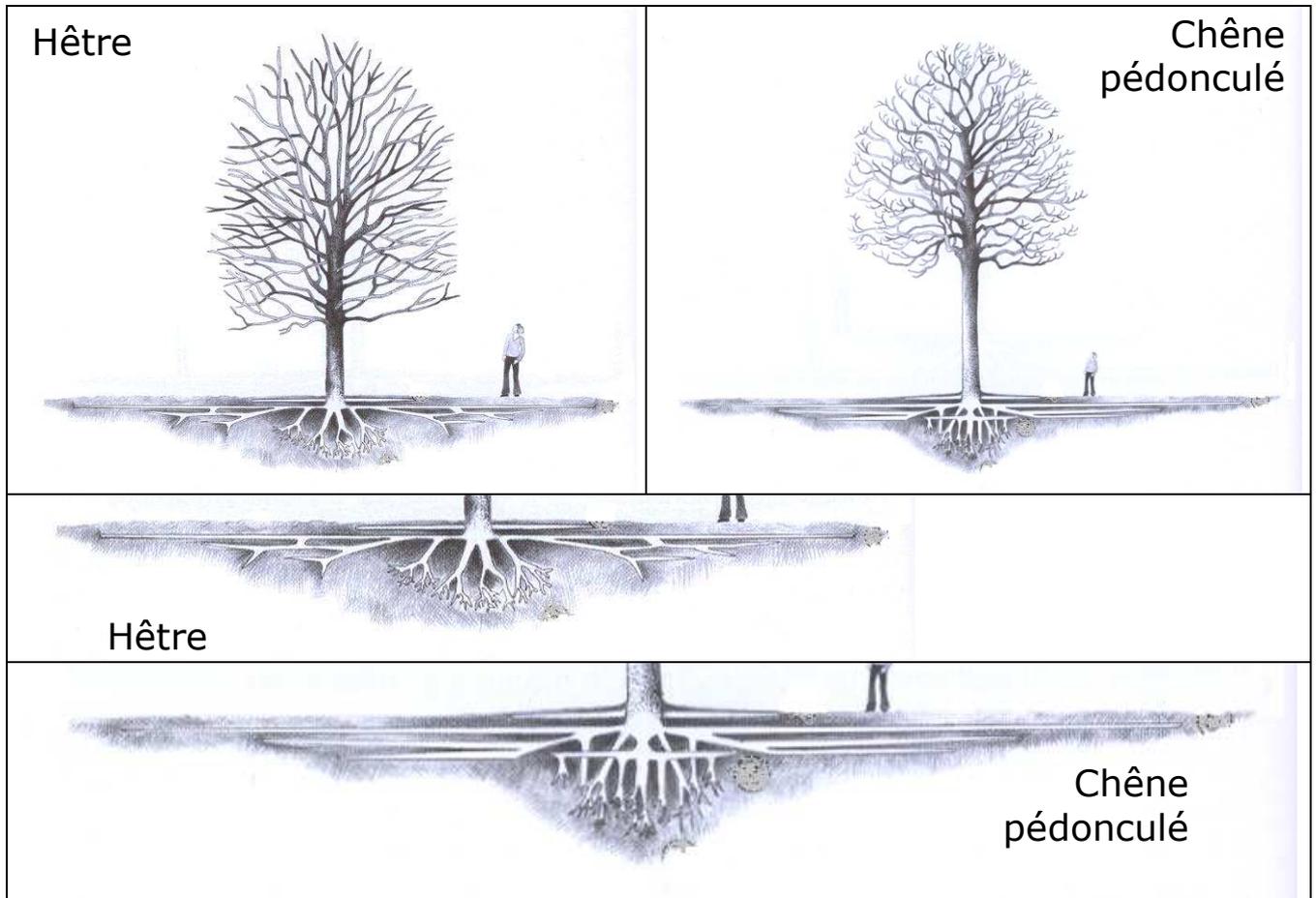


Figure 22 - Architecture comparée du hêtre (1^{ère} ligne à gauche) et du chêne pédonculé (1^{ère} ligne à droite) ; 2^{ème} ligne : zoom sur le système racinaire du hêtre ; 3^{ème} ligne : zoom sur le système racinaire du chêne pédonculé.

En ce qui concerne le hêtre, le pivot se développe relativement rapidement (5-10 ans), puis est « renforcé » par un système fasciculé de racines horizontales et obliques ramifiées (Drénou et al., 2006). Ces racines latérales se subdivisent en fourches réitératives successives très rapprochées. Il n'y a pas de pivots verticaux naissant directement sous les charpentières (racines horizontales de surface) et s'enfonçant dans le sol. Les racines profondes verticales résultent des séries de racine obliques dérivant les unes des autres par fourches successives.

Pour le Chêne, à partir du tronc, un nombre moyen de 7 contreforts par arbre forme une première ossature du système de surface (Drénou et al., 2006). Ecartés les uns des autres selon des angles de 30 à 60°, chacun de ces contreforts fourche et donne donc 2 racines, soit un total moyen de 14 charpentières (2 racines x 7 contreforts). Celles-ci vont coloniser le sol à plus de 20 m de distance de l'arbre sans dépasser une profondeur de 60 cm. Ensuite, un deuxième (sous-)étage de charpentières horizontales prend naissance sous la première couronne. Cette deuxième couronne est également constituée de ±14 racines, mais chacune d'elle a une extension qui ne dépasse pas 3 m. Le pivot racinaire principal du chêne produit des pivots secondaires obliques, tandis que les charpentières sont à l'origine des pivots

secondaires verticaux. Ces pivots se ramifient en l'absence de toute contrainte entre 90 et 150 cm de profondeur.

4.3.2.3.4. *Synthèse*

Le chêne sessile est une essence assez tolérante à la sécheresse pour trois raisons principales :

- Enracinement puissant et profond.
- Efficience du système de transport de sève.
- Capacité à maintenir une certaine ouverture stomatique, donc gardant une transpiration non négligeable et cela, dans des conditions de sécheresse relativement poussée (Bréda et al., 1993b).

Par son enracinement, le chêne pédonculé est capable de puiser de l'eau dans le sol à de grandes profondeurs. Les potentiels hydriques des deux chênes en situation de stress hydrique restent proches. Mais en situation de sécheresse, le chêne pédonculé se révèle moins tolérant que le sessile de par une moins bonne efficience du système de transport de sève et du développement de racines fines.

Le hêtre se révèle être l'essence la plus fragile du trio pour l'ensemble des paramètres étudiés.

4.3.2.4. *Perspectives*

A l'échelle de la vie d'un arbre en place, il est admis que l'économie en eau (combinaison t°/précipitations/réserve utile du sol) de la station sera le facteur le plus déterminant pour les peuplements forestiers soumis à une augmentation de la température et de la concentration de CO₂. Les essences, sous couvert d'une augmentation de température mais d'un régime hydrique satisfaisant peuvent éventuellement se maintenir. Un exemple en est la hêtraie de Valbonne, située dans le Gard (limite sud de la répartition du hêtre), à faible altitude. Reste à savoir si le cas de la forêt de Valbonne ne constitue pas une exception, la part génétique étant peut-être prédominante.

4.3.3. Situation d'engorgement

Avec des étés plus secs et des hivers plus pluvieux, il est également pertinent de se soucier de la réaction des essences face à un engorgement temporaire prolongé. La sensibilité des essences face à une anaérobiose est présentée dans le Tableau 9 (section 4.4.2)

Une étude comparative allemande (Schmull & Thomas, 2000) s'est attelée à la comparaison entre chêne sessile, chêne pédonculé et hêtre en situation d'engorgement prolongée. Les auteurs concluent à une tolérance du chêne pédonculé et dans une moindre mesure du chêne sessile face à un engorgement, le hêtre étant plus sensible à ce facteur. La formation de racines adventives a été observée sur les deux chênes et non sur le hêtre. La diminution de la conductance hydraulique est effective chez le hêtre, elle est moindre dans le cas du chêne pédonculé. Combiné à la conductance hydraulique du système racinaire, Schmull et Thomas observent un meilleur ajustement de la production de biomasse foliaire pour le chêne pédonculé et le sessile. Lévy et al. (Lévy et al., 1999) arrivent à la même conclusion : le

chêne sessile est plus sensible que le chêne pédonculé à une hypoxie au printemps due à un engorgement temporaire.

De manière empirique, sans entrer dans les détails écophysiologicals, il est avéré que l'engorgement limite l'enracinement aux horizons superficiels, avec comme conséquence qu'après consommation de la réserve hydrique de ces horizons, l'arbre est ensuite en situation de stress hydrique. Ce dernier se produira d'autant plus que l'été est peu pluvieux, ce qui sera de plus en plus le cas dans le cadre des changements climatiques. En forêt de Soignes, ce phénomène apparaît localement de manière critique, mais a conduit dans l'état actuel du climat à un équilibre précaire.

4.4. Compaction des sols

4.4.1. Généralités

Des facteurs anthropiques peuvent également prendre une part de responsabilité dans le dépérissement d'un peuplement. Un exemple en est le tassement de sol à texture limoneuse par des engins de débardage (Nageleisen, 1994). La compaction d'un sol peut également trouver une origine non anthropique (cas du *Fragipan* de la forêt de Soignes). Vu la complexité qu'apporte ce facteur dans une caractérisation stationnelle de la forêt bruxelloise, une section en annexe (annexe 1) reprend de manière plus détaillée cette thématique « compaction des sols ». Cette complexité provient d'une part de l'influence de cette compacité sur la réserve utile en eau, sur le développement racinaire, sur la stabilité des arbres, et d'autre part, de l'hétérogénéité dans la présence et dans l'intensité de cette compacité. Cette partie s'atèle également à définir au mieux le phénomène pédologique du *Fragipan*. Pour le lecteur peu familiarisé avec ce phénomène, il est probablement judicieux de la lire avant de continuer plus en avant dans cette section.

4.4.2. Fichier écologique des essences

Le Tableau 9 reprend les sensibilités face aux sols compactés, mais également face aux phénomènes d'anaérobiose (Weissen et al., 1991).

Tableau 9 - Sensibilité des essences face à la compacité des sols et à l'anaérobiose (I: insensible, PS: peu sensible, S: sensible, TS: très sensible); tiré du fichier écologique des essences (extrait de Baix et al. 1991)

Feuillus	Compacité	Anaérobiose	Résineux	Compacité	Anaérobiose
<i>Fagus sylvatica</i>	S	S	<i>Larix decidua</i>	TS	TS
<i>Quercus petraea</i>	I	I si temporaire	<i>Larix kaempferi</i>	S	S
<i>Quercus robur</i>	I	I	<i>Larix X eurolepis</i>	S	S
<i>Quercus rubra</i>	S	TS si compact	<i>Pinus sylvestris</i>	PS	PS si temporaire
<i>Acer pseudoplatanus</i>	S	S	<i>Pinus nigra (laricio)</i>	S	TS
<i>Fraxinus excelsior</i>	S	S	<i>Pinus nigra (nigra)</i>	S	TS
<i>Carpinus betulus</i>	PS	S	<i>Pinus nigra (koekelare)</i>	S	TS
<i>Prunus avium</i>	S	S			
<i>Robinia pseudoacacia</i>	S	TS			
<i>Betula pendula</i>	S	S			

4.4.3. Facteur *Fragipan*

Considérons tout d'abord le facteur *Fragipan*. Les racines des chênes, tout comme le hêtre et de toutes autres espèces, ne sont pas à même de traverser un *Fragipan*. L'encadré suivant ce paragraphe reprend le résumé d'une étude comparée des enracinements du hêtre et du chêne sessile, et ce sous diverses contraintes édaphiques, dont la présence d'un *Fragipan* pour la station n°2 (Lebourgeois & Jabiol, 2002).

Comparaison de l'enracinement entre le hêtre et le chêne sessile dans différentes conditions édaphiques, extrait de Lebourgeois et Jabiol, 2002

La réaction des essences par rapport aux contraintes du sol modifie le développement racinaire. Des études ont été menées sur des jeunes plans, en milieux contrôlés. Une confirmation sur des individus adultes est difficile à mettre en œuvre. Cependant, l'étude de chablis sporadiques dans différentes stations peut apporter de précieuses informations. Différentes mesures peuvent être réalisées sur la motte de ces chablis (Figure 23) : la petite (Y) et grande base (X) d'une ellipse comprenant la motte de terre de l'arbre, une mesure de profondeur de cette motte (W), la mesure de longueur des racines dépassant la motte (Z), une hauteur de la tige, la circonférence. Une estimation du volume de sol prospecté par l'arbre est donc calculée. De là, une estimation du réservoir en eau disponible pour l'arbre est également envisageable (Baize & Jabiol, 1995).

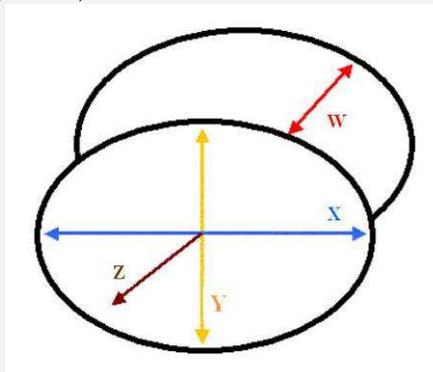
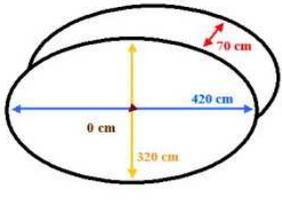
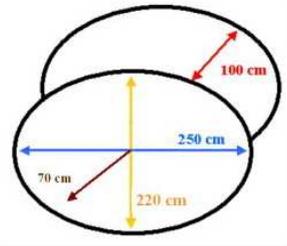
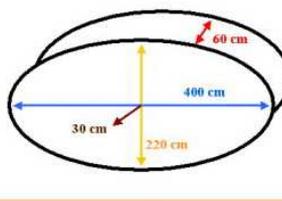
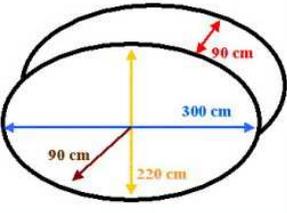
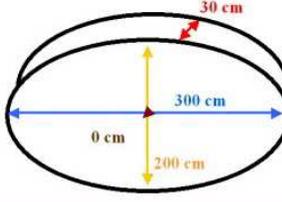
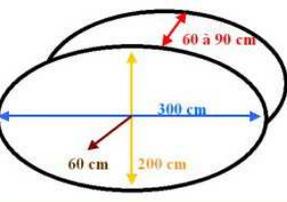
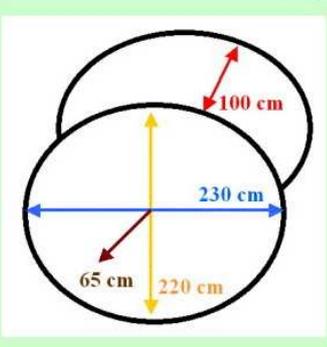
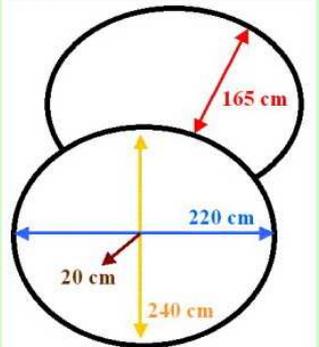


Figure 23 - Schéma de la représentation simplifiée du système racinaire des arbres mesurés

Le Tableau 10 reprend l'architecture du système racinaire des trois essences étudiées et ce en milieu non contraignant et milieux contraignants. Différentes contraintes au développement racinaire existent : compacité du sol, absence de macroporosité, présence d'éléments grossiers, engorgement du sol.

Tableau 10 - Description de l'architecture racinaire de chablis de chêne sessile et de hêtre pour 4 stations différentes, extrait de Lebourgeois et Jabiol 2002

		Hêtre	Chêne sessile
Station 1	Profil synthétique:	<i>Limon puis argile limoneuse meubles et bien drainés sur argile lourde à 80 cm, à eumull</i>	
	Contraintes:	<i>Argile lourde mal structurée, compacte et à mauvais drainage vertical</i>	
	Dimensions motte:		
	Surface :	11 m ²	4 m ²
	Volume de la motte :	7 m ³	4 m ³
	Volume prospecté:	7 m ³	7 m ³
	D130 :	55 cm	45 cm
	Conséquences:		
Station 2	Profil synthétique:	<i>Limon très meuble, très peu hydromorphe, sur limon compacté (fragipan) à 50 cm, à moder</i>	
	Contraintes:	<i>Très forte compacité de l'horizon fragipan</i>	
	Dimensions motte:		
	Surface :	7 m ²	5 m ²
	Volume de la motte :	4 m ³	5 m ³
	Volume prospecté:	6 m ³	9 m ³
	D130 :	60 cm	85 cm
	Conséquences:		
Station 3	Profil synthétique:	<i>Sable très acide à très hydromorphe (blanchi jusqu'à la surface, à hydromoder) sur argile sableuse à 45 cm, à galets</i>	
	Contraintes:	<i>Engorgement très prolongé jusqu'à la surface. Argile sableuse compacte et mal structurée à 80 cm. Indurations locales à profondeurs variables (galets en lentilles)</i>	
	Dimensions motte:		
	Surface :	5 m ²	5 m ²
	Volume de la motte :	1,5 m ³	3 à 4 m ³
	Volume prospecté:	1,5 m ³	6 m ³
	D130 :	30 cm	60 cm
	Conséquences:		

Station 4	Profil synthétique:	<i>Limons (à galets) sur argiles lourdes à faible profondeur (à galets), à mésomull</i>	
	Contraintes:	<i>Contrainte supposée : argile lourde mal structurée compacte</i>	
	Dimensions motte:		
	Surface :	4 m ²	4 m ²
	Volume de la motte :	4 m ³	7 m ³
	Volume prospecté:	7 m ³	8 m ³
	D130 :	80 cm	70 cm
Conséquences:			

Dans le cas de la forêt de Soignes, la station n°2, avec présence d'un *Fragipan*, retient particulièrement notre attention.

Si l'on observe l'enracinement du hêtre, le chablis étudié possède une motte plate et s'arrêtant à la limite d'apparition du *Fragipan* (60 cm). Les racines dépassant la motte sont décrites comme courtes, déformées en forme de « crochets ». Le *Fragipan* constitue bien une barrière infranchissable pour le hêtre, les racines ne pouvant s'infiltrer que dans les discontinuités de cette couche compactée.

En ce qui concerne le chêne sessile, la motte est qualifiée de forme globuleuse et a une profondeur plus élevée (90 cm). Les racines pivot dépassants cette motte ont une forme aplatie, mais exploitent mieux les discontinuités que le système racinaire du hêtre. Cependant, le *Fragipan* reste un obstacle infranchissable au bon développement racinaire du chêne. On constate dans ce cas-ci que la contrainte est très forte pour le hêtre, accusant un « déficit » de volume prospecté de 3 m³ par rapport au chêne sessile (6 m³ contre 9 m³).

D'une manière plus générale, le hêtre est plus sensible que le chêne à l'anaérobiose et à la compacité. En situation contraignante, il adopte un système racinaire traçant, prospectant les parties les plus superficielles du sol.

Le phénomène *Fragipan* est présent sur l'ensemble de la zone d'étude, les sols de type Abc et Aba(b) étant concerné et couvrant 75 % du massif. Il apparaît à une profondeur comprise entre 25 et 40 cm et a une épaisseur pouvant aller jusqu'à 1,2 m. On considère qu'environ 10 % de la surface concernée n'est pas pourvue de ce système (Langohr R., communication personnelle), cause en est les chablis anciens (pendant 10.000 ans). Ces chablis ont en effet perturbé les 80-90 premiers centimètres du sol, dans certains cas plus profondément, jusqu'à 2 mètres. La répartition de ces 10 % est naturellement aléatoire.

En ce qui concerne le comportement de ce *Fragipan* face au système racinaire des arbres, aucune essence ne peut passer. Ce comportement est appelé système des boîtes fermées (*closed box system*) (Langohr & Mikkelsen, 2001). Ces « boîtes » de formes polygonales sont poreuses mais sans liaison entre ces pores, les rendant imperméable aux racines et à l'eau. Les racines s'infiltrant donc dans les fentes polygonales (entre les boîtes). La taille de ces boîtes varie avec le drainage : 40-60 cm de diamètre pour un drainage légèrement excessif et un diamètre beaucoup plus petit à mesure que le drainage devient mauvais. Il n'y aucune corrélation entre la taille de ces boîtes et le relief.

Les racines se développent donc dans les intervalles du *closed box system* pour atteindre une profondeur de 3-4 mètres. A cette profondeur se situe le loess avec une charge calcaire conférant aux hêtres de la forêt de Soignes une si bonne productivité. Les racines y sont fortement présentes. Dans cette optique, il n'y aucune contrainte pour le hêtre jusqu'à un âge compris entre 60 et 80 ans. A ce stade de développement, les racines envahissant les fentes polygonales sont aplaties et occupent l'ensemble de l'espace disponible (colmatage). Les racines du hêtre étant sensibles à l'anaérobiose, ces racines s'asphyxient donc sous l'effet de leur propre croissance. L'arbre, pouvant atteindre à cet âge une hauteur de 30-35 mètres, est donc privé de la réserve nutritive du loess calcique de profondeur. De même, cet arbre devient sensible au vent de part son système racinaire vivant limité à la couche biologiquement active superficielle (30 à 50 cm de profondeur).

Même si le *Fragipan* est limitant pour les deux espèces, elles arrivent actuellement à puiser les ressources nécessaires, d'une part par une architecture racinaire traçante, d'autre part en exploitant les glosses ou autres discontinuités de cette couche compactée. Suite à l'épisode « sécheresse 2003 », on est à même de s'interroger sur le rôle de cet horizon compacté face aux mouvements d'eau dans le sol. Deux cas de figures sont mettre en exergue :

- En situation de sécheresse, d'une part, le système racinaire étant « cantonné » à de faibles profondeurs, les arbres se retrouvent plus rapidement en situation de stress hydrique, d'autant plus que cette couche freine une remontée capillaire de l'humidité vers les horizons supérieurs. Dans une telle situation, les chênes sont plus à même d'aller puiser profondeur l'eau présente dans les horizons inférieurs.
- En situation de fortes précipitations hivernales, le *Fragipan* agit également comme un frein au transfert d'eau, mais cette fois-ci, vers le sens de l'infiltration. Suivant l'intensité et l'homogénéité de ce *Fragipan*, on peut assister à la formation d'une nappe temporaire agissant de manière limitante face à des essences sensibles aux engorgements et à l'anaérobiose.

En synthèse de ce facteur *Fragipan*, il faut donc souligner sa composante aggravante face à d'éventuelles sècheresses plus fréquentes et plus accrues en intensité. Le facteur âge est également à prendre en compte par rapport à l'accessibilité du système racinaire au loess carbonaté. L'asphyxie et la mort de ces racines privent à l'arbre un apport trophique mais également hydrique pesant lourd dans la balance finale d'un épisode sec prolongé.

4.4.4. Compaction de surface

Un problème sans doute encore plus pré-pondérant que le phénomène *Fragipan* reste les problèmes de compaction de la couche superficielle du sol. Cette problématique a déjà été abordée dans des études antérieures sur la compaction des sols ainsi que sur la régénération

naturelle du hêtre (El Bayad, 1996; Herbauts et al., 1998; Langohr & Cuyckens, 1986; Vitlox et al., 2000, 2001).

Un exemple de cette problématique au niveau des arbres adultes est l'épisode de sécheresse prolongée qui est survenu lors de l'été 1976 (Langohr, communication personnelle). Suite à cette sécheresse, des dépérissements ont été signalés, dépérissements principalement inféodés aux zones de libre circulation des cavaliers.

Cette compaction, pouvant « agir » sur les 30 premiers centimètres du sol, sont fortement préjudiciable au développement d'une grande partie de la flore herbacée, mais également sur l'émergence d'une régénération naturelle des essences en place, et tout particulièrement dans le cas du hêtre. En effet, le problème se situe au niveau de l'eau (*water supply*), mais également au niveau des racines qui ne savent plus passer. Une proportion d'argile de 8-10 % peut créer une mosaïque de fissures en été suite à une sécheresse, mais la régénération reste tout de même plus faible. De plus, si l'on rajoute la présence d'un *Fragipan* en dessous, on retrouve une couche biologiquement active relativement mince et prise en sandwich par deux couches compactées, ce qui met en péril la bonne croissance du faible taux de régénération cité à la phrase précédente.

D'un point de vue gestion, il serait intéressant de disposer d'une cartographie de ce phénomène de compaction superficielle. Une telle carte existe, mais non digitalisée, réalisée début des années 80 à l'initiative du Professeur Langohr, et couvrant environ 40% du massif sonien (les 3 régions confondues). Nous discuterons dans une section ultérieure le détail de cette carte et de son exploitation en matière de gestion sylvicole. De même, identifier les espèces herbacées indicatrices d'une compaction superficielle et les cartographier apporterait également une information précieuse quant à la répartition spatiale du phénomène. Ce dernier point sera également aborder ultérieurement.

4.5. Pauvreté chimique

La pauvreté chimique n'apparaît pas comme un facteur déclenchant du dépérissement, mais cela reste un facteur prédisposant important affaiblissant les arbres (Etienne, 2001). Exemple en est la pauvreté en base des sols bruns acides à moder situés dans le massif ardennais et rendant un équilibre nutritionnel fragile pour les tiges en place (van Praag & Weissen, 1986). Egalement, un déficit en magnésium apparaît comme prépondérant dans le dépérissement de l'épicéa commun et du hêtre en Wallonie (Weissen et al., 1992).

En ce qui concerne le hêtre, Leuschner et al. (Leuschner et al., 2004) concluent que la variation dans l'acidité du sol et sa fertilité ont peu d'influence sur la taille des fines racines et de leur morphologie. Cependant, la pauvreté du sol affecte la structure du système racinaire et probablement la mortalité des fines racines.

En forêt de Soignes, Le limon de surface s'avère essentiellement acide, mais le loess cabonaté situé à une profondeur variable offre une excellente richesse chimique aux racines, à condition de passer outre le *Fragipan* par les glosses formant une discontinuité de cet horizon impénétrable. La profondeur d'apparition du loess est estimée à 3-4 mètres. Elle peut cependant varier en fonction de différents facteurs tels que la pente, l'exposition. Sur des versants abrupts (plus de 30° de pente) et avec une exposition Nord – Nord-Est (provenance des vents dominants), une « remontée » de cette couche calcaire est observée, remontée due à

à des phénomènes d’incisions périglaciaires. Elle apparaît à 2 –2,5 m de profondeur, contre 4 m pour une exposition Sud – Sud-Ouest (à l’abri du vent et de la pluie). Cette situation est très spécifique car marginale d’un point de vue surfacique sur la zone d’étude. En plus d’une « remontée » de la couche calcaire, une absence du réseau en boîte fermée est également relevée.

4.6. Vent

Le vent agit comme facteur aggravant. Face à des vents fréquents et forts, la transpiration augmente, la photosynthèse et la croissance diminuent. Le microclimat en sera affecté. De plus, lors de situations critiques et plus rares, divers dégâts interviennent : bris de branches, ruptures de racines, décollement d’anneaux, fentes dans l’aubier, chablis. Le Tableau 11 illustre la sensibilité des différentes essences aux stations venteuses.

Tableau 11 - Sensibilité des essences face aux stations venteuses (PS: peu sensible, S: sensible, TS: très sensible); tiré du fichier écologique des essences (Weissen et al. 1991)

Feuillus			Résineux		
<i>Fagus sylvatica</i>	Juvenile	PS	<i>Larix decidua</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Quercus petraea</i>	Juvenile	PS	<i>Larix kaempferi</i>	Juvenile	S
	Adulte	PS		Adulte	S
<i>Quercus robur</i>	Juvenile	PS	<i>Larix X eurolepis</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Quercus rubra</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus sylvestris</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (laricio)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Fraxinus excelsior</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (nigra)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Carpinus betulus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (koekelare)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Prunus avium</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	S			
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			
<i>Betula pendula</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			

De par les différents phénomènes de compaction présents en forêt de Soignes, la problématique des chablis revêt une importance particulière. Le *Fragipan*, de part cette barrière infranchissable cantonne le système racinaire dans les 50 premiers centimètres. Les racines pénètrent tout de même par les discontinuités polygonales du système en boîtes fermées, mais s’asphyxient après un certain âge. C’est à ce stade que l’arbre est le plus exposé au danger de chablis, au même titre qu’un dépérissement engendré après un long épisode sec. Cet aspect « Chablis », ainsi que les questions s’y rapportant, seront discutés dans une section ultérieure (Partie 4, dernier chapitre).

4.7. Neige

La neige, plus précisément la neige collante, peut occasionner des dégâts dans des zones de basses altitudes, avec des essences moins adaptées à ce phénomène. Les essences sensibles que l'on rencontre en forêt de Soignes sont exposées dans le Tableau 12.

Tableau 12 - Sensibilité des essences face au givre et à la neige collante (PS: peu sensible, S: sensible, TS: très sensible); tiré du fichier écologique des essences (extrait de Weissen et al. 1991)

Feuillus			Résineux		
<i>Fagus sylvatica</i>	Juvenile	S	<i>Larix decidua</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Quercus petraea</i>	Juvenile	S	<i>Larix kaempferi</i>	Juvenile	TS
	Adulte	S		Adulte	S
<i>Quercus robur</i>	Juvenile	S	<i>Larix X eurolepis</i>	Juvenile	PS
	Adulte	S		Adulte	PS
<i>Quercus rubra</i>	Juvenile	S	<i>Pinus sylvestris</i>	Juvenile	TS
	Adulte	PS		Adulte	TS
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (laricio)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	S
<i>Fraxinus excelsior</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (nigra)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	PS		Adulte	PS
<i>Carpinus betulus</i>	Juvenile	PS	<i>Pinus nigra (koekelare)</i>	Juvenile	PS
	Adulte	S		Adulte	PS
<i>Prunus avium</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	PS			
<i>Robinia pseudoacacia</i>	Juvenile	S			
	Adulte	S			
<i>Betula pendula</i>	Juvenile	PS			
	Adulte	S			

Le risque de l'influence de ce facteur par rapport aux autres est anecdotique en forêt de Soignes. Il l'est encore plus dans le cadre d'un réchauffement climatique.

4.8. Facteurs biotiques

Les connaissances actuelles ne nous permettent pas de prévoir de façon précise l'évolution des problèmes sanitaires (Marçais et al., 2000). Les tendances sont toutefois développées dans la littérature.

4.8.1. Effets directs des changements climatiques

4.8.1.1. Sur les insectes

Différents processus physiologiques de développement des insectes sont à citer (Dubois-Coli & Wolff, 2008): survie hivernale, vitesse de développement des stades larvaires, potentiel reproductif, essaimage, etc. Les effets principaux suivants sont à souligner :

- Réchauffement hivernal : déplacement de la limite de répartition de certaines espèces vers le nord et en altitude.
- Réchauffement printanier : avec une accélération des processus physiologiques, certains insectes pourront augmenter le nombre de générations par an. Des essaimages plus fréquents sont également à prévoir.

4.8.1.2. Sur les agents pathogènes

Les agents pathogènes présentent la capacité de se développer dans une large gamme de conditions environnementales. Exemple en est les champignons qui peuvent résister à des niveaux de sécheresse plus élevés que leur plante-hôte. Tout comme les insectes, une période de multiplication allongée et une extension d'aire de répartition sont à prévoir pour certains (Dubois-Coli & Wolff, 2008). Point de vue extension d'aire de répartition, un des cas les plus étudiés est celui de *Phytophthora cinnamomi* (Brasier, 1996; Marçais et al., 2000; Maurel, 2001). Agissant sur les racines fines, ce pathogène est responsable de dépérissement de chênes-liège (*Quercus suber*) et de chênes verts (*Quercus ilex*) dans le sud de la France (Thomas et al., 2002) lors d'épisodes de sécheresse.

4.8.2. Effets indirects des changements climatiques

Sans entrer dans le détail, citons différentes interactions possibles (Dubois-Coli & Wolff, 2008):

- Migration d'insectes avec leur hôte : concerne l'aire de répartition d'insectes oligophages (ex : *Cryptococcus fagisuga*).
- Synchronisme entre arbres et insectes : cette situation a lieu quand un ravageur sous sa forme « virulente » s'attaque à un stade bien précis de la phénologie de l'arbre. Or le déterminisme des stades phénologiques du ravageur et de l'essence ciblée peuvent être différents. Par exemple la température pour l'éclosion des œufs ou la sortie d'hivernage des insectes et un couplage température/photopériode pour le débourrement. La tordeuse verte (*Tortrix viridana*) a une tolérance faible face à un décalage des deux stades phénologiques « propices ». Le bombyx disparate (*Lymantria dispar*) et la processionnaire du chêne (*Thaumetopoea processionea*) sont plus tolérants de ce point de vue.
- Altération de la physiologie de l'hôte modifiant sa sensibilité aux ravageurs : notamment en induisant des stress hydriques plus fréquents et plus longs. L'impact d'une sécheresse peut être différentiel selon la spécialité de l'espèce (ex : xylophage et phyllophages) (Rouault et al., 2006).

4.8.3. Synthèse des ravageurs du hêtre et des chênes pédonculé et sessile

Le Tableau 13 reprend une synthèse des principaux ravageurs des trois espèces. Cette synthèse ne prétend donc pas reprendre l'ensemble des maladies et ravageurs de ces essences. La colonne « incidence » reprend les modalités suivantes :

- Principal : Impact significatif dans nos régions, dans un dépérissement. Maladie répertoriée largement dans la littérature.
- Secondaire : Impacts moins élevés, maladies moins répandues ou affectant de manière moindre les arbres.

- **Réchauffement** : Peu ou pas répandu dans notre région mais pouvant prendre une plus grande ampleur face à un réchauffement climatique, soit par un élargissement de l'aire de répartition, soit par des conditions de température plus optimales.

Tableau 13 - Synthèse des différents ravageurs et pathogènes s'attaquant au hêtre et aux chênes pédonculé et sessile. P= principal ; S=secondaire ; R=réchauffement.

	Sites d'attaque	Conditions d'apparition	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Quercus petraea</i>	Incidence	Bibliographie
<i>Agrilus biguttatus</i> (Agriles)	Tronc, branches	Arbres affaiblis		X	X	P	Thomas et al. 2002; Siwecki et Ufnalski 1998
<i>Agrilus viridis</i> (Agriles)	Tronc, branches		X			S	Armand 2002; Siwecki et Ufnalski 1998; Bary-Lenger et Nebout 1993
<i>Apiognomonina errabunda</i> (anthracnose du hêtre)	Feuilles		X			S	Armand 2002
<i>Armillaria bulbosa</i> (Armillaires)	Racines, tronc	Arbres affaiblis, défoliation		X	X	S	Weissen et al. 1991
<i>Armillaria mellea</i>	Racines	sols secs	X			P	Weissen et al. 1991; Armand 2002; Thomas et al. 2002; Siwecki et Ufnalski 1998; Bary-Lenger et Nebout 1993
<i>Balaninus spp</i> (Charançons)	Glands			X	X	S	Weissen et al. 1991
<i>Ciboria batschiana</i> (Pourriture noire des glands)	Glands			X	X	S	Weissen et al. 1991
<i>Collybia fusipes</i>	Racines	Peuplements matures		X		P	Thomas et al. 2002; Siwecki et Ufnalski 1998
<i>Cryptococcus fagi</i> (Cochenille du hêtre)	Ecorce	Hiver rude, sécheresse	X			P	Weissen et al. 1991; Armand 2002
<i>Dasychira pudibunda</i> (Orgye pudibonde)	Feuilles		X			P	Weissen et al. 1991
<i>Discula quercina</i>	Cime, rameaux			X	X	P	Weissen et al. 1991
<i>Discula umbrinella</i> (anthracnose du hêtre)	Feuilles		X			S	Armand 2002
<i>Fomes fomentarius</i> (Polypores)	Tronc	Souvent après attaque de <i>Nectria coccinea</i>	X			S	Weissen et al. 1991
<i>Lymantria dispar</i> (Bonbyx disparate)	Feuilles	Climat, coïncidence entre l'apparition des jeunes chenilles et le débournement	X	X	X	P	Weissen et al. 1991; Armand 2002; Thomas et al. 2002; Siwecki et Ufnalski 1998; Bary-Lenger et Nebout 1993
<i>Microsphaera alphioides</i> (Oïdium)	Feuilles	Brusque mise en lumière		X	X	S	Weissen et al. 1991; Siwecki et Ufnalski 1998; Bary-Lenger et Nebout 1993
<i>Nectria ditissima</i> (Chancre du hêtre)	Tronc, branches	jeunes peuplements denses	X			P	Weissen et al. 1991; Armand 2002
<i>Operophtera brumata</i>	Feuilles	Coïncidence entre l'apparition des jeunes chenilles et le débournement	X	X	X	P	Weissen et al. 1991; Armand 2002; Thomas et al. 2002
<i>Operophtera fagata</i>	Feuilles		X			S	Armand 2002
<i>Ophiostoma spp</i>	Tronc	Symbiose avec <i>Trypodendron domesticum</i>	X			S	Huart et al. 2003; Siwecki et Ufnalski 1998
<i>Phyllaphis fagi</i> (puceron laineux du hêtre)	Feuilles		X			S	Armand 2002
<i>Phytophthora cinnamomi</i>	Racines fines	Sécheresse		(X)	(X)	R	Thomas et al. 2002; Siwecki et Ufnalski 1998
<i>Phytophthora citricola</i>	Racines fines			X	X	S	Thomas et al. 2002; Siwecki et Ufnalski 1998
<i>Phytophthora omnivora</i> (Fonte des semis)	Tigelles et jeunes feuilles	Excès d'humidité et ombrage, densité semis trop grande	X			P	Weissen et al. 1991; Siwecki et Ufnalski 1998
<i>Phytophthora quercina</i>	Racines fines			X	X	P	Thomas et al. 2002; Siwecki et Ufnalski 1998
<i>Polypores sp</i> (Pourriture blanche)	Tronc, branches			X	X	S	Weissen et al. 1991
<i>Rhizoctonia solani</i> (Pourriture des faines)	Graines	surtout sur humus moder	X			S	Weissen et al. 1991
<i>Rhynchoenus fagi</i> (Orchestre du hêtre)	Feuilles		X			P	Weissen et al. 1991; Armand 2002
<i>Taphrorychus bicolor</i> (Scolyte)	Tronc		X			R	Armand 2002
<i>Thaumetopoea processionnea</i> (Processionnaire du chêne)	Feuilles			X	X	P	Bary-Lenger et Nebout 1993

4.9. Perspectives

Vu les interrogations encore nombreuses en ce qui concerne l'évolution des relations ravageurs/hôtes face à un réchauffement climatique et vu le caractère « facteur aggravant » de ces facteurs biotiques intervenant dans un dépérissement, l'aspect biotique est à considérer comme un élément d'incertitude supplémentaire, de nature à modifier les conclusions concernant l'avenir des essences et de leur gestion sylvicole dans les conditions écologiques futures.

4.10. CO₂

4.10.1. Généralités

Au cours des 200 derniers millénaires et hors influence humaine, la concentration de CO₂ a oscillé entre 200 et 280 vpm (volume par million ou partie par million volumique). Au cours du siècle dernier, cette concentration est passée de 280 à 360 vpm (Guehl et al., 1999). Selon les scénarii d'émissions, la concentration de CO₂ pourra doubler, voire dans la pire des situations, tripler à la fin de ce siècle. Face à une augmentation si rapide, la végétation se retrouve exposée à des concentrations jamais atteintes au cours de leur cheminement évolutif récent.

4.10.2. Données éco-physiologiques

Plusieurs études ont abordé la réaction de jeunes arbres (sous atmosphère contrôlée et sur des durées variables) face à des concentrations grandissante de CO₂ (jusqu'à 700 vpm, deux fois la concentration actuelle) (Guehl et al., 1999). Les études portant sur des individus adultes sont difficiles à mettre en œuvre car coûteuses, et de ce fait, rares.

Les effets directs d'une augmentation de CO₂ sont les suivants :

- Effet « anti-transpirant » : diminution de la conductance stomatique, ce qui diminue le flux de vapeur d'eau sortant des feuilles, mais également le flux de CO₂ rentrant dans la feuille. Cet effet reste très variable en fonction des espèces exposées.
- Vitesse d'assimilation du CO₂ augmentée : dans les conditions atmosphériques actuelles, la concentration de CO₂ est limitante dans la réaction de fixation de celui-ci par les chloroplastes. Si l'on augmente le CO₂ de 350 à 700 vpm, à une température de 25°C, la vitesse d'assimilation est multipliée par un facteur pouvant atteindre 1,8 (Guehl et al., 1999). Cette stimulation n'est cependant pas maintenue à long terme, un processus de régulation interne de la photosynthèse agissant au niveau des sites de croissance.

A un échelon plus « élevé », les conséquences d'une augmentation de la concentration en CO₂ sont les suivantes :

4.10.2.1. Effets sur la croissance

Croissance des arbres et des peuplements : du point de vue des essences forestières, de nombreuses données sont maintenant disponibles concernant les effets d'une augmentation du CO₂ sur la croissance des tiges (Asshoff et al., 2006; Becker et al., 1994; Bruhn et al., 2000; Cornelissen et al., 1999; Korner, 2003; Leverenz et al., 1999; Saxe et al., 2001; Saxe et al., 1998; Vivin et al., 1996). Les chênes pédonculés et sessiles ont été étudiés et un effet sur la morphogénèse a été mis en évidence (Guehl et al., 1999): accélération de la formation des pousses, augmentation du nombre moyen des pousses, du nombre de feuilles par pousse, de la taille moyenne de ces dernières. Cette croissance est déterminée par la capacité d'utilisation du carbone par la plante, et non par la capacité photosynthétique de fixer celui-ci. Point de vue dynamique des peuplements, les concentrations grandissantes de CO₂ occasionneront donc dans la majorité des cas une croissance initiale plus rapide, avec pour éventuelle conséquence une fermeture du couvert plus précoce. La sylviculture et les règles de conduite des peuplements devront probablement s'adapter.

4.10.2.2. *Effets sur la tolérance à la sécheresse*

La transpiration d'un peuplement dépend d'une part de l'indice foliaire et d'autre part, de la régulation de l'ouverture des stomates. Face à l'augmentation de CO₂, un effet anti-transpirant (brièvement décrit plus haut) peut intervenir. Ainsi, pour le chêne sessile, cet effet est réel car la conductance stomatique est diminuée sur l'ensemble du domaine de variation du potentiel hydrique (Guehl et al., 1999). Il en est de même pour les autres chênes. Pour d'autres essences, dont le hêtre, la conductance stomatique n'est pas modifiée par l'augmentation de CO₂ dans ce cas-ci. Le hêtre semble être défavorisé sur nombre de parcelles face à ces prévisions. Cet effet de fermeture stomatique et la stimulation de la photosynthèse liés à une haute concentration de CO₂ favorisent l'efficacité d'utilisation de l'eau (rapport *vitesse d'assimilation de CO₂/vitesse de transpiration*). Il s'ensuit une augmentation du rapport *production de biomasse/eau consommée*. Toutefois, ce dernier dépend également des pertes de carbone liées à plusieurs facteurs : processus de respiration avec dégagement de CO₂, exsudats racinaires, émissions de composés volatils, mortalité de certaines parties du végétal. Il est démontré dans le cas du chêne pédonculé que le cumul « concentration élevée de CO₂ » et « contraintes hydriques prononcées » provoque une augmentation significative de la quantité de carbone perdue par rapport au carbone assimilé. En conséquence, la stimulation de la production de biomasse et de l'efficacité d'utilisation de l'eau disparaît.

Appuyant ce qui est développé à la fin du paragraphe précédent, une étude plus récente (Ciais et al., 2005) a mis en évidence la réduction de la productivité primaire des végétaux lors de l'épisode de canicule et de sécheresse de l'année 2003. Les auteurs ont estimé à 30% la réduction de la productivité primaire brute de l'Europe. Cette réduction a abouti à une forte et anormale concentration nette de CO₂ dans l'atmosphère, ayant pour effet d'annuler 4 années de séquestration de carbones dans les écosystèmes. Les résultats de l'étude suggèrent que cette réduction de productivité puisse être expliquée par le déficit en précipitation et la vague de chaleur. Des documents historiques sur les baisses de rendement du passé montrent que cette baisse de rendement est sans précédent au 20^{ème} siècle.

4.10.3. **Perspectives**

Afin de définir des critères permettant de classer les différentes essences en groupes homogènes (répondant de la même manière à des concentrations de CO₂ élevées), des

recherches doivent encore être menées. En s'intéressant à la finalité productive de nos peuplements, il convient également de prendre en compte l'influence de ce CO₂ sur la composition biochimique et la qualité structurale du bois (Guehl et al., 1999).

Une augmentation future de la fréquence d'événements extrêmes comme la canicule de 2003 pose la question du comportement de la végétation. On pourrait assister à un retournement des écosystèmes tempérés comme source de carbone dans de tels épisodes, phénomène déjà prédit dans les tropiques et à hautes latitudes (Ciais et al., 2005).

4.11. Ozone troposphérique

Une autre interrogation survient par rapport au continuum sol-plante-atmosphère, quel sera l'effet d'une augmentation des pics de concentration d'ozone (liés à des pollutions anthropiques) sur la végétation forestière ? C'est de l'ozone troposphérique dont il est question ici. Les impacts de l'ozone sur la végétation sont effectifs à des niveaux de concentration plus bas pour la végétation que les taux définis par la norme en vigueur pour la santé humaine. Comme unité de mesure, l'AOT40 est retenue comme convention et est définie comme suit : « *cumul des doses horaires en ozone troposphérique qui se situent au-dessus du seuil de 80 µg/m³ (ou 40 ppb), mesurée chaque jour entre 8 et 20h ; on distingue en outre l'AOT40 pour la protection de la végétation, calculé sur une période de 3 mois (de début mai à fin juillet) et l'AOT40 pour les forêts, calculé sur une période de 6 mois (de début avril à fin septembre)* » (Blin et al., 2007).

Point de vue des effets sur la végétation, si les concentrations d'O₃ sont trop fortes, la plante ne produit pas suffisamment de substances pour dégrader cet ozone. A la suite de réactions biochimiques diverses, des dommages visibles apparaissent (nécroses, sénescence, ponctuations symptomatiques, etc) (Ulrich, 2005). Une exposition à l'ozone peut prédisposer les individus à l'attaque de défoliateurs (Paoletti et al., 2007).

Une réduction de croissance est également observée pour le chêne sessile par rapport à une atmosphère non surchargée en O₃ (Broadmeadow & Jackson, 2000). Une autre étude, cette fois sur le chêne pédonculé, n'a pas détecté de différence significative (avec et sans pollution d'ozone) dans la prise de CO₂ dans les processus photosynthétiques (Farage, 1996).

Les jeunes plants de hêtre sont plus sensibles à l'ozone que les individus adultes (Nunn et al., 2005). Pour des arbres adultes, la tolérance à la sécheresse des essences joue grandement dans la résistance à ce polluant (Gerosa et al., 2008). Le chêne pédonculé résiste mieux que le hêtre à des concentrations élevées d'O₃ (Gerosa et al., 2008; Klap et al., 2000). Une augmentation des concentrations en CO₂ associée à une situation de sécheresse interagissent également avec l'incidence de concentrations élevées en ozone. Cette interaction va dans le sens d'une baisse de l'impact de cette pollution à l'ozone pour le chêne sessile (Broadmeadow et al., 1999).

Une liste des espèces forestières considérées comme sensibles existe et reprend les essences suivantes (par ordre alphabétique) que l'on peut rencontrer dans les habitats de la forêt de Soignes (source : www.gva.es/ceam/ICP-Forests) : *Acer campestre*, *Acer platanoides*, *Acer pseudoplatanus*, *Alnus glutinosa*, *Alnus incana*, *Betula pendula*, *Carpinus betulus*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Larix decidua*, *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*, *Prunus avium*, *Quercus robur*, *Robinia pseudoacacia*.

L'impact de ce facteur reste obscur et la problématique peut sembler secondaire face à d'autres facteurs (sécheresse, température, contrainte édaphique). De plus, en sites urbanisés, ce polluant est à considérer avec tout un ensemble d'autres polluants (Paoletti, 2008). Cependant, si des mesures ne sont pas prises face à l'augmentation des concentrations moyennes annuelles, cet ozone pourra devenir à long terme un problème majeur (Ulrich, 2005).

Attentif à cette forme de pollution, les pouvoirs publics prennent des mesures en définissant des valeurs cibles à ne dépasser. Des efforts sont encore à fournir par rapport à la sensibilité des écosystèmes forestiers face à cette pollution (IBGE, 2007). La Figure 24 montre les différents AOT40 par an et moyenné sur une période de 5 ans, la valeur cible étant souvent approchée et même dépassée.

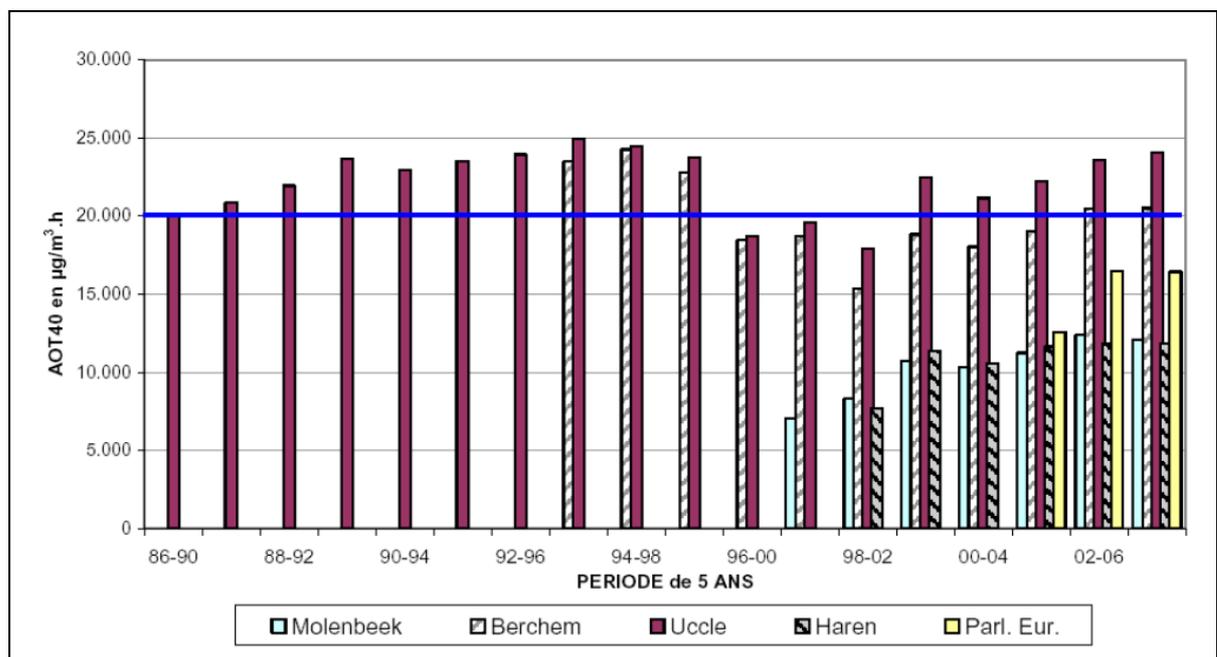


Figure 24 - AOT40 en moyenne sur 5 ans et pour 5 sites en Région Bruxelloise, pour la période allant d'avril à septembre, mesures effectuées entre 8 et 20h d'Europe centrale (AOT calculé à 100% de disponibilité) (source: IBGE 2007).

4.12. Retombées atmosphériques

4.12.1. Généralités

La présence d'une industrie lourde, d'un réseau routier, d'une grande ville, peut provoquer par ses émissions atmosphériques des effets néfastes sur les surfaces boisées à proximité. Ce type de phénomène reste cependant localisé (Etienne, 2001). Un transport de polluant sur de plus grandes distances pourra également avoir un effet direct, mais cet effet sera plus fréquemment indirect. Cette source de pollution provient principalement du SO₂ et de NO_x qui se transforment en acide dans l'atmosphère et donnent lieu à des pluies acides. Ce type de pollution augmente l'acidité du sol (apport de protons), la désaturation du complexe adsorbant et la libération d'aluminium. La pollution atmosphérique occasionne donc des « dégâts » sur le sol à long terme, particulièrement sur des sols déjà pauvres à l'origine (Etienne, 2001; Laurent & Lecomte, 2007).

4.12.2. Données éco-physiologiques

4.12.2.1. SO_2

Rappelons l'évolution des concentrations d'oxydes de soufre en Région bruxelloise. En 1970, les concentrations moyennes annuelles dépassaient largement les $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la zone d'étude. Le constat en 2005 révèle une nette amélioration de la maîtrise de ce polluant : concentrations annuelles moyennes de SO_2 entre 0 et $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la Région bruxelloise.

Une exposition à long terme des arbres au SO_2 peut affecter la photosynthèse, mais les chênes pédonculé et sessile sont relativement tolérant à ce polluant. Une fumigation de jeunes plants de chênes pédonculés pendant plus de 70 jours et avec des concentrations maximum de SO_2 de $470 \mu\text{g}/\text{m}^3$ n'a pas occasionné une réduction de la photosynthèse (Thomas & Runge, 1992). Une étude dans la région du Danube exclue ce facteur comme influençant la vigueur des chênes (Thomas et al., 2002). Ce facteur sera considéré comme secondaire dans la suite de l'étude qui nous occupe présentement.

4.12.2.2. Composés azotés

Les dépôts azotés sont responsables de l'acidification du sol. Les oxydes d'azote forment de l'acide nitrique dans l'atmosphère, et l'ammoniac se transforme dans les sols en nitrate qui contribue à l'acidification.

Un « approvisionnement » excédentaire d'azote peut affecter les arbres de différentes manières :

- Induction d'un déséquilibre nutritionnel qui peut être aggravé par la réduction du ratio racine/plante, réponse commune à l'augmentation d'assimilation d'azote. Des diminutions dans les concentrations des éléments suivants est observée : phosphore, magnésium, potassium. Cependant, aucune corrélation entre ces diminutions et la vigueur de peuplements de chênes étudiés n'a été mise en évidence (Thomas et al., 2002).
- Affectation du mécanisme d'installation de résistance au froid. En effet, une diminution des substances intervenant dans la mise en place de ce processus a été observée. Cependant, une étude concernant des jeunes plants de chênes et les mettant en présence de régime différentiel d'alimentation en azote n'a pas détecté une différence quant à la résistance au froid (Thomas & Ahlers, 1999).
- Diminution de la concentration en *allelochemicals*. Ces composants, incluant des composés phénols et leur dérivés (ex : les tanins), sont importants pour la défense des végétaux face aux herbivores. Chez le chêne pédonculé, mais pas chez le chêne sessile, une combinaison entre excès d'azote et une sécheresse baisse significativement la teneur en tanin des feuilles. Un tel cas de figure augmente le risque d'une attaque en masse d'un insecte défoliateur (Thomas et al., 2002).
- Aggravation de la pauvreté chimique du sol. En termes de dépôts en peuplements de chêne, NH_4^+ semble constituer la fraction la plus importante des dépôts acides (Thomas & Büttner, 1998). La nitrification du NH_4^+ conduit à une acidification du système si le NO_3^- sortant n'est pas dégradé par la végétation. Ce facteur n'a pas été mis en évidence comme prépondérant dans l'apparition d'un dépérissement chez les

chênes. Cependant, si ces retombées continue, le risque futur de perturber l'équilibre des écosystème (notamment l'équilibre nutritionnel) grandira également (Thomas et al., 2002).

L'influence des phénomènes et impacts de l'eutrophisation sur la flore herbacée n'est pas développée ici, mais rappelons que ces impacts ne sont pas négligeables. Une modification de la végétation au profit d'espèces plus exigeantes en azote et en éléments nutritifs peuvent aller l'encontre du maintien d'espèces à caractère patrimonial (Dupouey et al., 1999).

4.13. Facteur âge

Le facteur âge est tout simplement également à prendre en considération. Pour le hêtre, le dépérissement intervient d'une manière systématique à un âge avancé. Pour d'autres essences, un dépérissement peut prendre forme à divers âges : l'érable sycomore, le peuplier, le frêne, l'aulne glutineux.

4.14. Synthèse et conclusion

4.14.1. Synthèse générale

Comme pour la partie « réchauffement climatique », ce chapitre s'atèle à synthétiser l'information développée dans cette partie. En connaissance des prévisions, le Tableau 14 reprend également la notion de risque qu'un facteur ou l'autre soit limitant au maintien des essences abordées dans la zone d'étude. La colonne « Risque » reprend les dénominations suivantes :

- **Limitant** : ce facteur sera des plus prépondérants et risque d'éloigner fortement l'essence concernée de son optimum (si optimum il y a), voire même de l'exclure de la zone d'étude entière ou d'une partie.
- **Significatif** : ce facteur aura une influence néfaste dans le contexte d'un réchauffement, soit de part lui-même, soit par l'aggravation d'un autre facteur.
- **Doute** : ce facteur risque peut-être d'avoir un rôle néfaste dans le contexte d'un réchauffement climatique, ce rôle reste toutefois flou (peu de connaissance quant à l'évolution de ce facteur) et secondaire par rapport aux facteurs L et S.
- **Non significatif** : ce facteur ne représente pas un risque dans le contexte d'un réchauffement climatique.
- **Positif** : ce facteur a un effet positif (croissance, etc) sur l'essence dans le contexte du réchauffement climatique.

Tableau 14 - Synthèse des facteurs éco-physiologiques du hêtre et des chênes pédonculé et sessile et risque associé face à réchauffement climatique.

	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Quercus petraea</i>	Risque			Remarques
				Fs	Qr	Qp	
Température							
Température maximum critique	41 °C	45 °C	45 °C	L	N	N	Associée à une vague de chaleur sèche
Température annuelle moyenne	max 12°C	max 13,5°C	max 15°C	L	N	N	Limite de tolérance pour le hêtre
Influence sur la phénologie	augmente avec T°	diminue avec T°		D	D	D	Risque accru en combinaison avec une sensibilité aux gelées tardives
Gelées tardives	Très sensible	Adulte sensible	Juvénile sensible	D	D	D	Risque accru en combinaison avec un avancement du débournement
Gelées précoces	Peu sensible	Peu sensible	Peu sensible	N	N	N	Risque accru mais peu sensible au phénomène
Température minimale	jusqu'à -30°C	jusqu'à -30°C	jusqu'à -30°C	P	P	P	Réchauffement hivernal
Régime hydrique							
Précipitations annuelles moyennes	min 750mm (T° opt)	min 600mm (T° opt)	min 600mm (T° opt)	L	N	N	Diminution plus prononcée en saison de végétation
Hygrométrie	85%	80%	80%	L	N	N	En combinaison avec la température et les précipitations
Sécheresse	Très sensible	Sensible	Peu sensible	L	L	N	Facteur limitant, aggravé par la composante compaction des sols
Engorgement	Sensible	Insensible	Insensible si temporaire	S	N	N	Précipitations hivernales en combinaison avec une nappe temporaire
Compaction des sols							
Fragipan	Très sensible	Sensible	Sensible	S	S	S	Facteur aggravant le facteur sécheresse
Hors Fragipan	Très sensible	Insensible	Insensible	L	S	S	Facteur aggravant le facteur sécheresse et affectant la régénération
Pauvreté chimique	?	?	?	D	D	D	Facteur pré-disposant à un dépérissement
Vent	Peu sensible	Peu sensible	Peu sensible	S	N	N	Augmentation des tempêtes, avec sols détrempés et <i>Fragipan</i>
Neige	Sensible	Sensible	Sensible	P	P	P	Diminution des épisodes neigeux
Facteurs biotiques	?	?	?	D	D	D	Diverses questions: aire de répartition, concordance de phénologie, etc
CO2	positif? négatif	positif? négatif	positif? négatif	D	D	D	Effets à combiner avec la température, la sécheresse, etc
Ozone	Sensible	Moins sensible	Peu sensible	D	D	D	Contrôle des pics d'ozone par le secteur publique
Retombées atmosphériques							
SO2		Peu sensible	Peu sensible	N	N	N	Facteur non significatif dans la littérature
Composés azotés		Peu sensible	Peu sensible	D	D	D	Risque futur d'un déséquilibre nutritionnel

Reprenons pour chaque essence quels sont les facteurs limitants face aux changements auxquels on peut s'attendre d'ici l'horizon 2100 :

4.14.2. Le hêtre

Principale essence productive de la forêt de Soignes, c'est aussi la plus problématique quant à son maintien dans l'avenir.

Quatre grands facteurs limitants compromettent son maintien comme première essence de production, mais également dans le maintien d'un patrimoine paysager (hêtraie cathédrale) :

- Point de vue chaleur non compensable, le hêtre reste plus sensible que les deux chênes : 41°C de maximum critique contre 45°C pour les chênes.
- Température annuelle moyenne : les températures augmenteront, jusqu'à flirter avec le maximum de tolérance pour l'espèce. Dans de telles conditions et pour un maintien de l'essence, des conditions compensatoires doivent intervenir : réserve en eau dans le sol non limitante, facteur fraîcheur par la topographie (fonds de vallée, cuvettes).
- Précipitations annuelles moyennes : les exigences de l'espèce prévoient des prévisions moyennes annuelles minimales de 750mm, alors que pour l'horizon 2100, il est prévu une moyenne de 740mm pour le Nord du sillon Sambre-et-Meuse. De plus, ces précipitations ne sont pas réparties de manière homogène durant l'année et une plus forte baisse (15%) des précipitations est à prévoir durant la saison de végétation. Des facteurs de compensation permettent le maintien du hêtre à des niveaux de pluies plus bas : grande réserve utile du sol, apports hydriques dus à la topographie.
- Hygrométrie : liée à la température et aux précipitations, les prévisions ne font pas état de ce facteur. Cependant, vu les tendances affichées pour les températures et précipitations et au vue des besoins élevés du hêtre par rapport à cette humidité atmosphériques, ce facteur est également un facteur limitant.
- Sécheresse : proche du facteur « précipitations », ce facteur est à considérer en regard de la relation arbre-sol. A la vue des autres facteurs, le hêtre ne pourra se maintenir que dans conditions restreintes : bonne réserve utile, topographie concave, pas de phénomène de compaction. C'est ce facteur « sécheresse » qui apparaît comme le plus prépondérant par rapport à une action possible par le choix des essences.

4.14.3. Le chêne pédonculé

D'un point de vue hygrométrie et températures estivales, le chêne pédonculé se maintiendra beaucoup mieux que le hêtre, à la seule condition (mais non des moindres) de ne pas se retrouver dans une situation de stress hydrique prolongé. En ce qui concerne les phénomènes de compaction, le *Fragipan* reste une barrière infranchissable même pour le chêne, même si son système racinaire semble plus efficace que celui du hêtre. La compaction superficielle a un effet moindre sur la régénération naturelle du chêne par rapport à celle du hêtre. Le système racinaire du chêne a même un impact positif sur la porosité du sol.

Deuxième grande essence feuillue de production en forêt de Soignes, le chêne pédonculé est également une essence connue pour son dépérissement. Le facteur limitant mettant à mal son maintien comme grande essence de production reste la sécheresse. Plus tolérant que le hêtre et possédant un système racinaire lui donnant la capacité de prospecter plus en profondeur, son intolérance aux épisodes de sécheresse prolongée l'exclura dans l'avenir des zones topographiquement à risque : zones convexes prononcées et versants chauds.

4.14.4. Le chêne sessile

D'un point de vue hygrométrie et températures estivales, le chêne sessile, tout comme le pédonculé, se maintiendra beaucoup mieux que le hêtre. De plus, le chêne sessile reste plus tolérant à la sécheresse que le pédonculé. En ce qui concerne les phénomènes de compaction, le *Fragipan* reste une barrière infranchissable au même titre que pour les deux autres essences, son système racinaire a les mêmes caractéristiques que le pédonculé.

Des trois essences étudiées, le chêne sessile est le plus à même à faire face aux épisodes grandissants de sécheresses prolongées. Aucun facteur limitant n'est à mettre en exergue sur la zone d'étude. Bien entendu, la potentialité sylvicole de cette essence doit être abordée à l'échelle stationnelle. Cependant, cette essence semble même apporter une réponse aux interrogations que soulève le hêtre et le chêne pédonculé. Par son enracinement puissant, sa tolérance à la sécheresse et son aspect paysager, la reconversion de la hêtraie située en zones à risque par du chêne sessile semble une solution à envisager. Ce point est discuté unité stationnelle par unité stationnelle dans la partie suivante intitulée « *Catalogue des stations* ».

4.14.5. Conclusion

Les considérations apportées dans cette partie « éco-physiologie » sont transposées sur l'ensemble de la zone d'étude, en considérant la présence respective des trois essences sur cette zone. Il semble logique que la problématique au sein de cette zone est plus complexe et relève des différents types de sols présents, de la topographie, des apports d'eau, de l'exposition, d'éventuels aspects contraignants. Afin de caractériser au mieux et même de cartographier les risques, un catalogue des stations semble l'outil le plus approprié afin d'aborder les impacts du réchauffement climatique sur la forêt de Soignes et sa sylviculture.

Avant d'aborder la réalisation de ce catalogue des stations, la partie suivante reprend une synthèse bibliographique (sous forme de fiches) non seulement des trois essences abordées dans cette section (centralisation des références bibliographiques), mais également des essences suivantes : érable sycomore, frêne, charme, merisier, robinier, bouleau verruqueux, sapin de Vancouver, les mélèzes et les pins.

HÊTRE COMMUN*Fagus sylvatica* L.

Beech

Bibliographie

Ammer, C. (2003). Growth and biomass partitioning of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. seedlings in response to shading and small changes in the R/FR-ratio of radiation. *Ann. For. Sci.*, 60, 163-171.

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Armand, G. (2002). *Le hêtre autrement.*, pp 263 p. Institut pour le Développement Forestier, Paris.

Aussenac, G. & Boulangeat, C. (1980). Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans deux peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Ann. For. Sci.*, 37 (2), 91-107.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Baar, F. (2008). Sylviculture d'arbres-objectifs en hêtre et chêne: retours du terrain. *Forêt wallonne*, 97 (39-59).

Balandier, P., Sinoquet, H., Frak, E., Giuliani, R., Vandame, M., Descamps, S., Coll, L., Adam, B., Prevosto, B., & Curt, T. (2007). Six-year time course of light-use efficiency, carbon gain and growth of beech saplings (*Fagus sylvatica*) planted under a Scots pine (*Pinus sylvestris*) shelterwood. 27, 1073-1082.

Blaschke, L., Forstreuter, M., Sheppard, L.J., Leith, I.K., Murray, M.B., & Polle, A. (2002). Lignification in beech (*Fagus sylvatica*) grown at elevated CO₂ concentrations: interaction with nutrient availability and leaf maturation. 22, 469-477.

Bontemps, J.-D. (2006). *Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXe siècle*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux & Forêts, Champenoux (France).

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

- Broadmeadow, M.S.J., Heath, J., & Randle, T.J. (1999). Environmental Limitations to O₃ Uptake - Some Key Results from Young Trees Growing at Elevated CO₂ Concentrations. *Water, Air, & Soil Pollution*, 116 (1), 299-310.
- Bruhn, D., Leverenz, J.W., & Saxe, H. (2000). Effects of tree size and temperature on relative growth rate and its components of *Fagus sylvatica* seedlings exposed to two partial pressures of atmospheric [CO₂]. *New Phytologist*, 146 (3), 415-425.
- Di Filippo, A., Biondi, F., Cufar, K., de Luis, M., Grabner, M., Maugeri, M., Presutti Saba, E., Schirone, B., & Piovesan, G. (2007). Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *Journal of Biogeography*, 34, 1873-1892.
- Dittmar, C., Fricke, W., & Elling, W. (2006). Impact of late frost events on radial growth of common beech (*Fagus sylvatica*L.) in Southern Germany. *Eur. J. Forest Res.*, 125, 249-259.
- Dupré, S., Thiébaud, B., & Teissier du Cros, E. (1986). Morphologie et architecture des jeunes hêtres (*Fagus sylvatica* L.): influence du milieu, variabilité génétique. *Ann. For. Sci.*, 43 (1), 85-102.
- Duquesnay, A., Dupouey, J.L., Clement, A., Ulrich, E., & Le Tacon, F. (2000). Spatial and temporal variability of foliar mineral concentration in beech (*Fagus sylvatica*) stands in northeastern France. 20, 13-22.
- El Bayad, J. (1996). *Dégradation hydromorphe des sols limoneux acides sous monoculture de hêtre en forêt de Soignes. Contribution à l'étude des conséquences édaphiques du compactage des sols par l'exploitation forestière mécanisée.* Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Fang, J. & Lechowicz, M. (2006). Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus* L.) species in the world. *Journal of Biogeography*, 33, 1804-1819.
- Fotelli, M.N., Nahm, M., Radoglou, K., Rennenberg, H., Halyvopoulos, G., & Matzarakis, A. (2009). Seasonal and interannual ecophysiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) at its south-eastern distribution limit in Europe. *Forest ecology and management*, 257, 1157-1164.
- Fotelli, M.N., Rudolph, P., Rennenberg, H., & Gessler, A. (2005). Irradiance and temperature affect the competitive interference of blackberry on the physiology of European beech seedlings. *New Phytologist*, 165 (2), 453-462.
- Genet, H. (2009). *Ageing and site fertility impacts on carbon allocation among growth, respiration, carbohydrates storage and reproduction in oak and beech: experimental and modelling approaches.* PhD Thesis in Forest Biology, Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy.
- Gerosa, G., Marzuoli, R., Desotgiu, R., Bussotti, F., & Ballarin-Denti, A. (2008). Visible leaf injury in young trees of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in relation to ozone uptake and ozone exposure. An Open-Top Chambers experiment in South Alpine environmental conditions. *Environmental Pollution*, 152 (2), 274-284.

- Gessler, A., Schrempp, S., Matzarakis, A., Mayer, H., Rennenberg, H., & Adams, M.A. (2001). Radiation modifies the effect of water availability on the carbon isotope composition of beech (*Fagus sylvatica*). *New Phytologist*, 150 (3), 653-664.
- Giesecke, T., Hickler, T., Kunkel, T., Sykes, M.T., & Bradshaw, R.H.W. (2007). Towards an understanding of the Holocene distribution of *Fagus sylvatica* L. *Journal of Biogeography*, 34 (1), 118-131.
- Granier, A. (2003). *Le site-atelier de Hesse (Moselle) Hêtre*. ORE Fonctionnement des écosystèmes forestiers.
- Granier, A., Badeau, V., & Breda, N. (1995). Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 59-68.
- Granier, A., Biron, P., & Lemoine, D. (2000). Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100, 291-308.
- Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I.A., Falge, E., Ciais, P., Grünwald, T., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Facini, O., Grassi, G., Heinesch, B., Ilvesniemi, H., Keronen, P., Knohl, A., Köstner, B., Lagergren, F., Lindroth, A., Longdoz, B., Loustau, D., Mateus, J., Montagnani, L., Nys, C., Moors, E., Papale, D., Peiffer, M., Pilegaard, K., Pita, G., Pumpanen, J., Rambal, S., Rebmann, C., Rodrigues, A., Seufert, G., Tenhunen, J., Vesala, T., & Wang, Q. (2007). Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143 (1-2), 123-145.
- Herbst, M., Eschenbach, C., & Kappen, L. (1999). Water use in neighbouring stands of beech (*Fagus sylvatica* L.) and black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Ann. For. Sci.*, 56, 107-120.
- Huart, O., De Proft, M., Grégoire, J.-C., Piel, F., Gaubicher, B., Carlier, F.-X., Maraïte, H., & Rondeux, J. (2003). Le point sur la maladie du Hêtre en Wallonie. *Forêt wallonne*, 64, 2-20.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Jonard, M., André, F., Jonard, F., Mouton, N., Procès, P., & Ponette, Q. (2007). Soil carbon dioxide efflux in pure and mixed stands of oak and beech. *Ann. For. Sci.*, 64 (2), 141-150.
- Jump, A.S., Hunt, J.M., Martinez-Izquierdo, J.A., & Penuelas, J. (2006). Natural selection and climate change: temperature-linked spatial and temporal trends in gene frequency in *Fagus sylvatica*. *Molecular Ecology*, 15 (11), 3469-3480.
- Landmann, G., Dupouey, J.L., Badeau, V., Lefevre, Y., Bréda, N., Nageleisen, L.-M., Chuine, I., & Lebourgeois, F. (2008). Le hêtre face aux changements climatiques: connaître les points faibles du hêtre pour mieux les surmonter. *Forêt entreprise*, 182, 30-34.

- Lebourgeois, F. (2005). Approche dendroécologique de la sensibilité du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. *Revue Forestière Française*, 57 (1), 33-49.
- Lebourgeois, F., Bréda, N., Ulrich, E., & Granier, A. (2005). Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19, 385-401.
- Lebourgeois, F. & Jabiol, B. (2002). Enracinement comparés du Chêne sessile, du Chêne pédonculé et du Hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française*, LIV (1-2002), 17-42.
- Lemoine, D., Jacquemin, S., & Granier, A. (2002). Beech (*Fagus sylvatica* L.) branches show acclimation of xylem anatomy and hydraulic properties to increased light after thinning. *Ann. For. Sci.*, 59, 761-766.
- Leuschner, C., Hertel, D., Schmid, I., Koch, O., Muhs, A., & Hölscher, D. (2004). Stand fine root biomass and fine root morphology in old-growth beech forests as a function of preprecipitation and soil fertility. *Plant and Soil*, 258, 43-56.
- Leverenz, J.W., Bruhn, D., & Saxe, H. (1999). Responses of two provenances of *Fagus sylvatica* seedlings to a combination of four temperature and two CO₂ treatments during their first growing season: gas exchange of leaves and roots. *New Phytologist*, 144 (3), 437-454.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Misson, L., Rasse, D.P., Vincke, C., Aubinet, M., & François, L. (2002). Predicting transpiration from forest stands in Belgium for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111 (4), 265-282.
- Nageleisen, L.-M. (1994). Le dépérissement actuel des feuillus divers: hêtre, merisier, alisier torminal, érable sycomore, peuplier, châtaignier, charme, aulne glutineux. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 554-562.
- Nageleisen, L.-M. (2005). Dépérissement du hêtre :présentation d'une méthode symptomatologique de suivi. *Revue Forestière Française*, LVII (2-2005), 255-262.
- Nageleisen, L.-M. & Huart, O. (2005). Problèmes sanitaires d'actualité en Hêtraie: la maladie du Hêtre dans les Ardennes. *Revue Forestière Française*, LVII (2-2005), 249-254.
- Ningre, N. & Colin, F. (2007). Frost damage on the terminal shoot as a risk factor of fork incidence on common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Ann. For. Sci.*, 64, 79-86.
- Nunn, A.J., Kozovits, A.R., Reiter, I.M., Heerdt, C., Leuchner, M., Lütz, C., Liu, X., Lo'w, M., Winkler, J.B., Grams, T.E.E., Häberle, K.-H., Werner, H., Fabian, P., Rennenberg, H., & Matyssek, R. (2005). Comparison of ozone uptake and sensitivity between a phytotron study

- with young beech and a field experiment with adult beech (*Fagus sylvatica*). *Environmental Pollution*, 137 (3), 494-506.
- Övergaard, R., Gemmel, P., & Karlsson, M. (2007). Effects of weather conditions on mast year frequency in beech (*Fagus sylvatica* L.) in Sweden. *Forestry*, 80 (5), 557-565.
- Penninckx, V., Meerts, P., Herbauts, J., & Gruber, W. (1999). Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. *Forest Ecology and Management*, 113, 23-33.
- Perin, J. & Claessens, H. (2009). Considérations sur la désignation et le détournage en chênes et hêtre. *Forêt wallonne*, 98, 39-52.
- Persuy, A. (2005). A propos de l'avenir du Hêtre en France. *Revue Forestière Française*, 57 (5), 462.
- Peuke, A.D., Gessler, A., & Rennenberg, H. (2006). The effect of drought on C and N stable isotopes in different fractions of leaves, stems and roots of sensitive and tolerant beech ecotypes. *Plant, Cell & Environment*, 29 (5), 823-835.
- Peuke, A.D., Schraml, C., & Rennenberg, H. (2002). Identification of drought-sensitive beech ecotypes by physiological parameters. *New Phytologist*, 154, 373-387.
- Picard, J.F. (1994). Evolution de la croissance radiale du hêtre (*Fagus sylvatica* L) dans les Vosges. Premiers résultats sur le versant lorrain. *Ann. For. Sci.*, 52, 11-21.
- Pihlatie, M., Ambus, P., Rinne, J., Pilegaard, K., & Vesala, T. (2005). Plant-mediated nitrous oxide emissions from beech (*Fagus sylvatica*) leaves. *New Phytologist*, 168 (1), 93-98.
- Pouderoux, S., Deleuze, C., & Dhôte, J.-F. (2001). Analyse du rendement des houppiers dans un essai d'éclaircie de hêtre grâce à un modèle à base écophysiological. *Ann. For. Sci.*, 58, 261-275.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecoite, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rozas, V. (2001). Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain. *Ann. For. Sci.*, 58, 237-251.
- Rubio, A. & Sánchez-Palomares, O. (2006). Physiographic and climatic potential areas for *Fagus sylvatica* L. based on habitat suitability indicator models. *Forestry*, 79 (4), 439-451.
- Schmull, M. & Thomas, F.M. (2000). Morphological and physiological reactions of young deciduous trees (*Quercus robur* L., *Q. petraea* [Matt.] Liebl., *Fagus sylvatica* L.) to waterlogging. *Plant and Soil*, 225, 227-242.
- Schutz, J.-P. (2006). Modelling the demographic sustainability of pure beech plenter forests in Eastern Germany. *Ann. For. Sci.*, 63, 93-100.

Teissier Du Cros, E., Le Tacon, F., Nepveu, G., Pardé, J., Perrin, R., & Timbal, J. (1981). *Le hêtre*, pp 613. Institut national de la Recherche Agronomique Département des Recherches Forestières, Paris.

Uemura, A., Ishida, A., Nakano, T., Terashima, I., Tanabe, H., & Matsumoto, Y. (2000). Acclimation of leaf characteristics of Fagus species to previous-year and current-year solar irradiances. 20, 945-951.

Vallet, P., Dhôte, J.-F., Le Moguédec, G., Ravart, M., & Pignard, G. (2006). Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 229, 98-110.

van Hees, A.F.M. (1997). Growth and morphology of pedunculate oak (*Quercus robur* L) and beech (*Fagus sylvatica* L) seedlings in relation to shading and drought. *Ann. For. Sci.*, 54, 9-18.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991a). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991b). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Bronchart, L., Piret, A., & Lambert, D. (1994). *Guide de boisement des stations forestières de Wallonie.*, pp 175 p. Ministère de la Région Wallonne. Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Jambes.

Weissen, F., van Praag, H.J., André, P., & Maréchal, P. (1992). Causes du dépérissement des forêts en Ardennes: observations et expérimentation. *Silva Belgica*, 99 (1), 9-13.

Weitner, A., Dupouey, J.L., Lefèvre, Y., Bréda, N., Badeau, V., Ferhi, A., Duquesnay, A., & Thimonier, A. (2007). Roles of soil chemistry and water availability in site-related $\delta^{13}C$ variations in French beech forests. 27, 1043-1051.

CHÊNE PÉDONCULÉ*Quercus robur* L.

Pedunculate oak

Ammer, C. (2003). Growth and biomass partitioning of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. seedlings in response to shading and small changes in the R/FR-ratio of radiation. *Ann. For. Sci.*, 60, 163-171.

André, P. & Laudelout, H. (1992). Le dépérissement du Chêne: Etat de la question et bibliographie. *Forêt wallonne*, 14, 16-20.

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Aussenac, G. & Lévy, G. (1983). Influence du dessèchement du sol sur le comportement hydrique et la croissance du chêne pédonculé (*Quercus pedunculata* Ehrl.) et du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) cultivés en cases de végétation. *Ann. For. Sci.*, 40 (3), 251-264.

Aussenac, G. & Valette, J.C. (1982). Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. For. Sci.*, 39 (1), 41-62.

Baar, F. (2008). Sylviculture d'arbres-objectifs en hêtre et chêne: retours du terrain. *Forêt wallonne*, 97 (39-59).

Bary-Lenger, A. & Nebout, J.P. (1993). *Les chênes pédonculé et sessile en France et en Belgique : Ecologie, Economie, histoire, sylviculture.*, pp 604 p. Editions du Perron, Allier.

Becker, M. & Lévy, G. (1990). Le point sur l'écologie du chêne sessile et du chêne pédonculé. *Revue Forestière Française*, XLII (2-1990), 148-154.

Becker, M., Nieminen, T.M., & Géréma, F. (1994). Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric 2. *Ann. For. Sci.*, 51, 477-492.

Bergès, L., Chevalier, R., Dumas, Y., Franc, F., & Gilbert, J.-M. (2005). Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Ann. For. Sci.*, 62, 391-402.

Bontemps, J.-D. (2006). *Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXe siècle*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux & Forêts, Champenoux (France).

- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- Bourgerly, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Brasier, C.M. (1996). Phytophthora cinnamomi and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Ann. For. Sci.*, 53, 347-358.
- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E., & Granier, A. (1993a). Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. *Ann. For. Sci.*, 50, 571-582.
- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E., & Granier, A. (1993b). Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 23 (6), 1136-1143.
- Bréda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (1995a). Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). 15, 295-306.
- Bréda, N., Granier, A., Barataud, F., & Moyne, C. (1995b). Soil water dynamics in an oak stand. *Plant and Soil*, 172, 17-27.
- Broadmeadow, M.S.J., Heath, J., & Randle, T.J. (1999). Environmental Limitations to O₃ Uptake - Some Key Results from Young Trees Growing at Elevated CO₂ Concentrations. *Water, Air, & Soil Pollution*, 116 (1), 299-310.
- Broadmeadow, M.S.J. & Jackson, S.B. (2000). Growth responses of *Quercus petraea*, *Fraxinus excelsior* and *Pinus sylvestris* to elevated carbon dioxide, ozone and water supply. *New Phytologist*, 146 (3), 437-451.
- Burgeon, D. (1991) Contribution à l'étude du dépérissement des chênes indigènes (*Quercus petraea* (Mattuscka) Lieblein & *Quercus robur* L.) : approches écologique et phytopathologique, pp. 96, v.p. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Buse, A., Dury, S.J., Woodburn, R.J.W., Perrins, C.M., & Good, J.E.G. (1999). Effects of elevated temperature on multi-species interactions: the case of Pedunculate Oak, Winter Moth and Tits. *Functional Ecology*, 13 (s1), 74-82.
- Chaar, H. & Colin, F. (1999). Impact of late frost on height growth in young sessile oak regenerations. *Ann. For. Sci.*, 56, 417-429.
- Cinotti, B. (1989). Winter moisture content and frost-crack occurrence in oak trees (*Quercus petraea* Liebl. and *Q. robur* L.). *Ann. For. Sci.*, 46, 614s-616s.
- Cochard, H., Bréda, N., & Granier, A. (1996). Whole tree hydraulic conductance and water loss regulation in *Quercus* during drought: evidence for stomatal control of embolism ? *Ann. For. Sci.*, 53, 197-206.

Cochard, H., Bréda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (1992). Vulnerability to air embolism of three european oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q pubescens* Willd, *Q robur* L). *Ann. For. Sci.*, 49, 225-233.

de Visser, P.H.B. (1994). *Growth and nutrition of Douglas fir, Scots pine and pedunculate oak in relation to soil acidification*. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands.

Delatour, C. (1983). Les dépérissements de Chênes en Europe. *Revue Forestière Française*, XXXV (4-1983), 265-282.

Dreyer, E., Colin-Belgrand, M., Sculler, I., Biron, P., Bousquet, F., & Aussenac, G. (1990). Diversité des caractéristiques écophysiological des chênes européens: quelques exemples. *Revue Forestière Française*, 42 (2), 174-181.

Dreyer, E., Granier, A., Breda, N., Cochard, H., Epron, D., & Aussenac, G. (1993). *Oak trees under drought constraints: ecophysiological aspects*. In *International Congress on Recent Advances in Studies on Oak Decline* (ed N.L. Luisi, P.; Vannini, A.), pp. 293-322, Selva di Fasano, Brindisi Italie.

Dulière, J.F. & Malaisse, F. (1995). Le point sur le dépérissement du Chêne: état des connaissances présenté au colloque international de Nancy (septembre 1994). *Forêt wallonne*, 22, 17-19.

Epron, D. & Dreyer, E. (1993). Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.] in a natural stand. *New Phytologist*, 125 (2), 381-389.

Etienne, M. (2001) La fertilité des sols en milieu forestier : La question du dépérissement du chêne, pp. 80 p. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

Farage, P.K. (1996). The effect of ozone fumigation over one season on photosynthetic processes of *Quercus robur* seedlings. *New Phytologist*, 134 (2), 279-285.

Focant, A. & Malaisse, F. (2001). Dépérissement du Chêne en Wallonie: état de la question. *Forêt wallonne*, 49-50, 17-35.

Genet, H. (2009). *Ageing and site fertility impacts on carbon allocation among growth, respiration, carbohydrates storage and reproduction in oak and beech: experimental and modelling approaches*. PhD Thesis in Forest Biology, Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy.

Gerosa, G., Marzuoli, R., Desotgiu, R., Bussotti, F., & Ballarin-Denti, A. (2008). Visible leaf injury in young trees of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in relation to ozone uptake and ozone exposure. An Open-Top Chambers experiment in South Alpine environmental conditions. *Environmental Pollution*, 152 (2), 274-284.

Gillet, A., Morelle, K., & Claessens, H. (2007). Peut-on se prémunir contre le dépérissement du chêne ? *Forêt wallonne*, 88, 3-12.

Giot-Wirgot, P., Ponette, Q., & Jonard, M. (2006). Le point sur une expérience d'amendements en peuplements d'épicéa, hêtre et chêne. *Forêt Wallonne*, 83 (4), 32-37.

Granier, A., Badeau, V., & Breda, N. (1995). Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 59-68.

Granier, A. & Bréda, N. (1996). Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. *Ann. For. Sci.*, 53, 537-546.

Granier, A., Bréda, N., Biron, P., & Villette, S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116 (2-3), 269-283.

Guehl, J.M., Picon, C., Aussenac, G., & Gross, P. (1994). Interactive effects of elevated CO₂ and soil drought on growth and transpiration efficiency and its determinants in two European forest tree species. 14, 707-724.

Hoff, C. & Rambal, S. (2003). An examination of the interaction between climate, soil and leaf area index in a *Quercus ilex* ecosystem. *Ann. For. Sci.*, 60, 153-161.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.

Jonard, M., André, F., Jonard, F., Mouton, N., Procès, P., & Ponette, Q. (2007). Soil carbon dioxide efflux in pure and mixed stands of oak and beech. *Ann. For. Sci.*, 64 (2), 141-150.

Kazda, M., Salzer, J., & Reiter, I. (2000). Photosynthetic capacity in relation to nitrogen in the canopy of a *Quercus robur*, *Fraxinus angustifolia* and *Tilia cordata* flood plain forest. 20, 1029-1037.

Lebourgeois, F. (2006). Sensibilité au climat des chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. *Revue Forestière Française*, 58, 29-43.

Lebourgeois, F., Cousseau, G., & Ducos, Y. (2004). Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the forest of Bercé ("Futaie des clos", Sarthe, France). *Ann. For. Sci.*, 61, 361-372.

Lebourgeois, F. & Jabiol, B. (2002). Enracinement comparés du Chêne sessile, du Chêne pédonculé et du Hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française*, LIV (1-2002), 17-42.

Lebourgeois, F., Spicher, F., & Lefèvre, Y. (2008). Relations croissance du Chêne pédonculé et climat sur deux types de sol à nappe temporaire en Lorraine (rédoxisol acide et pélosol différencié) *Revue Forestière Française*, LX (4), 411-424.

Ledig, F.T. (1993). Genetics of oak species and the spectre of global climate change. *Ann. For. Sci.*, 50 (1), 456s-460s.

- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.
- Lévy, G., Lefèvre, Y., Becker, M., Frochot, H., Picard, J.F., & Wagner, P.A. (1999). Les excès d'eau : influence sur la croissance des chênes. *Revue Forestière Française*, LI (2), 151-161.
- Lucot, E., Badot, P.M., & Bruckert, S. (1995). Influence de l'humidité du sol et de distribution des racines sur le potentiel hydrique du xylème dans des peuplements de Chêne (*Quercus* sp) de basse altitude. *Ann. For. Sci.*, 52, 173-182.
- Lucot, E. & Bruckert, S. (1992). Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). *Ann. For. Sci.*, 49, 465-479.
- Malaisse, F., Burgeon, D., Degreef, J., Deom, B., & van Doren, B. (1993). Le dépérissement des chênes indigènes en Europe occidentale. *Belg. Journ. Bot.*, 126 (2).
- Maudoux, J.-P. (1993) Contribution à l'étude du dépérissement des chênes indigènes (*Quercus petraea* (Mattuscka) Lieblein et *Quercus robur* L.) : écologie et pathologie du système racinaire., pp. 93, v.p. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Maurel, M. (2001). *Impact écophysiological sur jeunes chênes et châtaigniers de l'infection racinaire par *Phytophthora cinnamomi**. Doctorat, Université de Paris.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Misson, L., Rasse, D.P., Vincke, C., Aubinet, M., & François, L. (2002). Predicting transpiration from forest stands in Belgium for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111 (4), 265-282.
- Moortel, R.v., Rempelberg, S., & Deckers, J. (1998). Condition of *Quercus robur* L. along a natural Luvisol microtoposequence on loess in Central Belgium. *Soil Use and Management*, 14 (3), 184-186.
- Moraal, L.G. & Hilszczanski, J. (2000). The oak buprestid beetle, *Agrilus biguttatus* (F.) (Col., Buprestidae), a recent factor in oak decline in Europe. *Anzeiger für Schadlingskunde*, 73 (5), 134-138.
- Nebout, J.P. (2008). A propos des plantations mélangées de Chêne sessile, Pin laricio de Corse et Pin sylvestre. *Revue Forestière Française*, 60 (2), 279-288.
- Nizinski, J. & Saugier, B. (1989). Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en forêt de Fontainebleau. *Ann. For. Sci.*, 46, 173-186.

- Paoletti, E., Anselmi, N., & Franceschini, A. (2007). Pre-Exposure to Ozone Predisposes Oak Leaves to Attacks by *Diplodia corticola* and *Biscogniauxia mediterranea*. *The Scientific World Journal*, 7, 222-230.
- Parelle, J., Brendel, O., Jolivet, Y., & Dreyer, E. (2007). Intra- and interspecific diversity in the response to waterlogging of two co-occurring white oak species (*Quercus robur* and *Q. petraea*). 27, 1027-1034.
- Perin, J. & Claessens, H. (2009). Considérations sur la désignation et le détournage en chênes et hêtre. *Forêt wallonne*, 98, 39-52.
- Picon, C., Guehl, J.M., & Ferhi, A. (1996). Leaf gas exchange and carbon isotope composition responses to drought in a drought-avoiding (*Pinus pinaster*) and a drought-tolerant (*Quercus petraea*) species under present and elevated atmospheric CO₂ concentrations. *Plant, Cell & Environment*, 19, 182-190.
- Ponton, S., Dupouey, J.-L., Bréda, N., & Dreyer, E. (2002). Comparison of water-use efficiency of seedlings from two sympatric oak species: genotype × environment interactions. 22, 413-422.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecoïnte, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rozas, V. (2001). Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain. *Ann. For. Sci.*, 58, 237-251.
- Rozas, V. (2005). Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. *Annals of Forest Science*, 62, 209-218.
- Schmull, M. & Thomas, F.M. (2000). Morphological and physiological reactions of young deciduous trees (*Quercus robur* L., *Q. petraea* [Matt.] Liebl., *Fagus sylvatica* L.) to waterlogging. *Plant and Soil*, 225, 227-242.
- Sevrin, E. (1997). *Les chênes sessile et pédonculé*, pp 96. Institut pour le développement forestier, Paris.
- Sioen, G. & Roskams, P. (2006). Crown condition of *Quercus robur* in Flanders (Belgium). *Symposium: Forest in a changing environment - Results of 20 years ICP Forest Monitoring* (band142), Göttingen. 210-215.
- Siwkcki, R. & Ufnalski, K. (1998). Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *Forest Pathology*, 28 (2), 99-112.
- Tessier, L., Nola, P., & Serre-Bachet, F. (1994). Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region: tree-ring/climate relationships. *New Phytologist*, 126, 355-367.

- Thomas, F.M. & Ahlers, U. (1999). Effects of excess nitrogen on frost hardiness and freezing injury of above-ground tissue in young oaks (*Quercus petraea* and *Q. robur*). *New Phytologist*, 144 (1), 73-83.
- Thomas, F.M., Blank, R., & Hartmann, G. (2002). Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology*, 32 (4-5), 277-307.
- Thomas, F.M. & Büttner, G. (1998). Nutrient relations in healthy and damaged stands of mature oaks on clayey soils: two case studies in northwestern Germany. *Forest Ecology and Management*, 108 (3), 301-319.
- Thomas, F.M. & Runge, M. (1992). Proton Neutralization in the Leaves of English Oak (*Quercus robur* L.) Exposed to Sulphur Dioxide. *J. Exp. Bot.*, 43 (6), 803-809.
- Timbal, J. & Aussenac, G. (1996). An overview of ecology and silviculture of indigenous oaks in France. *Ann. For. Sci.*, 53, 649-661.
- Triboulot, M.B., Fauveau, M.L., Bréda, N., Label, P., & Dreyer, E. (1996). Stomatal conductance and xylem-sap abscisic acid (ABA) in adult oak trees during a gradually imposed drought. *Ann. For. Sci.*, 53, 207-220.
- Vallet, P., Dhôte, J.-F., Le Moguédec, G., Ravart, M., & Pignard, G. (2006). Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 229, 98-110.
- van Hees, A.F.M. (1997). Growth and morphology of pedunculate oak (*Quercus robur* L) and beech (*Fagus sylvatica* L) seedlings in relation to shading and drought. *Ann. For. Sci.*, 54, 9-18.
- Vincke, C., Granier, A., Bréda, N., & Devillez, F. (2005). Evapotranspiration of a declining *Quercus robur* (L.) stand from 1999 to 2001. II. Daily actual evapotranspiration and soil water reserve. *Ann. For. Sci.*, 62, 615-623.
- Vivin, P., Aussenac, G., & Lévy, G. (1993). Differences in drought resistance among 3 deciduous oak species grown in large boxes. *Ann. For. Sci.*, 50, 221-233.
- Vivin, P., Guehl, J.-M., Clément, A., & Aussenac, G. (1996). The effects of elevated CO₂ and water stress on whole plant CO₂ exchange, carbon allocation and osmoregulation in oak seedlings. *Ann. For. Sci.*, 53, 447-459.
- Wagemans, C. (1994). *Etude de la croissance en hauteur d'un peuplement de chênes sessiles (Quercus petraea (Mattuschka) Lieblein) en relation avec les conditions topographiques*. Mémoire de fin d'études, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Wattenbach, M., Hattermann, F., Weng, R., Wechsung, F., Krysanova, V., & Badeck, F. (2005). A simplified approach to implement forest eco-hydrological properties in regional hydrological modelling. *Ecological Modelling*, 187, 40-59.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991a). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991b). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Bronchart, L., Piret, A., & Lambert, D. (1994). *Guide de boisement des stations forestières de Wallonie.*, pp 175 p. Ministère de la Région Wallonne. Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Jambes.

Weissen, F., van Praag, H.J., André, P., & Maréchal, P. (1992). Causes du dépérissement des forêts en Ardennes: observations et expérimentation. *Silva Belgica*, 99 (1), 9-13.

CHÊNE SESSILE

Quercus petraea (Mattuschka) Lieblein

Sessile oak

Bibliographie

Ammer, C. (2003). Growth and biomass partitioning of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. seedlings in response to shading and small changes in the R/FR-ratio of radiation. *Ann. For. Sci.*, 60, 163-171.

André, P. & Laudelout, H. (1992). Le dépérissement du Chêne: Etat de la question et bibliographie. *Forêt wallonne*, 14, 16-20.

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Aussenac, G. & Lévy, G. (1983). Influence du dessèchement du sol sur le comportement hydrique et la croissance du chêne pédonculé (*Quercus pedunculata* Ehrh.) et du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) cultivés en cases de végétation. *Ann. For. Sci.*, 40 (3), 251-264.

Aussenac, G. & Valette, J.C. (1982). Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. For. Sci.*, 39 (1), 41-62.

- Baar, F. (2008). Sylviculture d'arbres-objectifs en hêtre et chêne: retours du terrain. *Forêt wallonne*, 97 (39-59).
- Bary-Lenger, A. & Nebout, J.P. (1993). *Les chênes pédonculé et sessile en France et en Belgique : Ecologie, Economie, histoire, sylviculture.*, pp 604 p. Editions du Perron, Allier.
- Becker, M. & Lévy, G. (1990). Le point sur l'écologie du chêne sessile et du chêne pédonculé. *Revue Forestière Française*, XLII (2-1990), 148-154.
- Becker, M., Nieminen, T.M., & Géréma, F. (1994). Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric 2. *Ann. For. Sci.*, 51, 477-492.
- Bergès, L., Chevalier, R., Dumas, Y., Franc, F., & Gilbert, J.-M. (2005). Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Ann. For. Sci.*, 62, 391-402.
- Bontemps, J.-D. (2006). *Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (Fagus sylvatica L.) et de chêne sessile (Quercus petraea Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXe siècle.* Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux & Forêts, Champenoux (France).
- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée.* Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- Bourger, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées.* IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Brasier, C.M. (1996). *Phytophthora cinnamomi* and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Ann. For. Sci.*, 53, 347-358.
- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E., & Granier, A. (1993a). Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. *Ann. For. Sci.*, 50, 571-582.
- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E., & Granier, A. (1993b). Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 23 (6), 1136-1143.
- Bréda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (1995a). Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). 15, 295-306.
- Bréda, N., Granier, A., Barataud, F., & Moyne, C. (1995b). Soil water dynamics in an oak stand. *Plant and Soil*, 172, 17-27.
- Broadmeadow, M.S.J., Heath, J., & Randle, T.J. (1999). Environmental Limitations to O₃ Uptake - Some Key Results from Young Trees Growing at Elevated CO₂ Concentrations. *Water, Air, & Soil Pollution*, 116 (1), 299-310.

- Broadmeadow, M.S.J. & Jackson, S.B. (2000). Growth responses of *Quercus petraea*, *Fraxinus excelsior* and *Pinus sylvestris* to elevated carbon dioxide, ozone and water supply. *New Phytologist*, 146 (3), 437-451.
- Burgeon, D. (1991) Contribution à l'étude du dépérissement des chênes indigènes (*Quercus petraea* (Mattuscka) Lieblein & *Quercus robur* L.) : approches écologique et phytopathologique, pp. 96, v.p. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Buse, A., Dury, S.J., Woodburn, R.J.W., Perrins, C.M., & Good, J.E.G. (1999). Effects of elevated temperature on multi-species interactions: the case of Pedunculate Oak, Winter Moth and Tits. *Functional Ecology*, 13 (s1), 74-82.
- Chaar, H. & Colin, F. (1999). Impact of late frost on height growth in young sessile oak regenerations. *Ann. For. Sci.*, 56, 417-429.
- Cinotti, B. (1989). Winter moisture content and frost-crack occurrence in oak trees (*Quercus petraea* Liebl. and *Q. robur* L.). *Ann. For. Sci.*, 46, 614s-616s.
- Cochard, H., Bréda, N., & Granier, A. (1996). Whole tree hydraulic conductance and water loss regulation in *Quercus* during drought: evidence for stomatal control of embolism ? *Ann. For. Sci.*, 53, 197-206.
- Cochard, H., Bréda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (1992). Vulnerability to air embolism of three european oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L.). *Ann. For. Sci.*, 49, 225-233.
- de Visser, P.H.B. (1994). *Growth and nutrition of Douglas fir, Scots pine and pedunculate oak in relation to soil acidification*. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands.
- Delatour, C. (1983). Les dépérissements de Chênes en Europe. *Revue Forestière Française*, XXXV (4-1983), 265-282.
- Dreyer, E., Colin-Belgrand, M., Sculler, I., Biron, P., Bousquet, F., & Aussenac, G. (1990). Diversité des caractéristiques écophysiological des chênes européens: quelques exemples. *Revue Forestière Française*, 42 (2), 174-181.
- Dreyer, E., Granier, A., Breda, N., Cochard, H., Epron, D., & Aussenac, G. (1993). *Oak trees under drought constraints: ecophysiological aspects*. In *International Congress on Recent Advances in Studies on Oak Decline* (ed N.L. Luisi, P.; Vannini, A.), pp. 293-322, Selva di Fasano, Brindisi Italie.
- Dulière, J.F. & Malaisse, F. (1995). Le point sur le dépérissement du Chêne: état des connaissances présenté au colloque international de Nancy (septembre 1994). *Forêt wallonne*, 22, 17-19.

- Epron, D. & Dreyer, E. (1993). Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.] in a natural stand. *New Phytologist*, 125 (2), 381-389.
- Etienne, M. (2001) La fertilité des sols en milieu forestier : La question du dépérissement du chêne, pp. 80 p. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- Farage, P.K. (1996). The effect of ozone fumigation over one season on photosynthetic processes of *Quercus robur* seedlings. *New Phytologist*, 134 (2), 279-285.
- Focant, A. & Malaisse, F. (2001). Dépérissement du Chêne en Wallonie: état de la question. *Forêt wallonne*, 49-50, 17-35.
- Genet, H. (2009). *Ageing and site fertility impacts on carbon allocation among growth, respiration, carbohydrates storage and reproduction in oak and beech: experimental and modelling approaches*. PhD Thesis in Forest Biology, Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy.
- Gerosa, G., Marzuoli, R., Desotgiu, R., Bussotti, F., & Ballarin-Denti, A. (2008). Visible leaf injury in young trees of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in relation to ozone uptake and ozone exposure. An Open-Top Chambers experiment in South Alpine environmental conditions. *Environmental Pollution*, 152 (2), 274-284.
- Gillet, A., Morelle, K., & Claessens, H. (2007). Peut-on se prémunir contre le dépérissement du chêne ? *Forêt wallonne*, 88, 3-12.
- Giot-Wirgot, P., Ponette, Q., & Jonard, M. (2006). Le point sur une expérience d'amendements en peuplements d'épicéa, hêtre et chêne. *Forêt Wallonne*, 83 (4), 32-37.
- Granier, A., Badeau, V., & Breda, N. (1995). Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 59-68.
- Granier, A. & Bréda, N. (1996). Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. *Ann. For. Sci.*, 53, 537-546.
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P., & Villette, S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116 (2-3), 269-283.
- Guehl, J.M., Picon, C., Aussenac, G., & Gross, P. (1994). Interactive effects of elevated CO₂ and soil drought on growth and transpiration efficiency and its determinants in two European forest tree species. *14*, 707-724.
- Hoff, C. & Rambal, S. (2003). An examination of the interaction between climate, soil and leaf area index in a *Quercus ilex* ecosystem. *Ann. For. Sci.*, 60, 153-161.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.

- Jonard, M., André, F., Jonard, F., Mouton, N., Procès, P., & Ponette, Q. (2007). Soil carbon dioxide efflux in pure and mixed stands of oak and beech. *Ann. For. Sci.*, 64 (2), 141-150.
- Kazda, M., Salzer, J., & Reiter, I. (2000). Photosynthetic capacity in relation to nitrogen in the canopy of a *Quercus robur*, *Fraxinus angustifolia* and *Tilia cordata* flood plain forest. 20, 1029-1037.
- Lebourgeois, F. (2006). Sensibilité au climat des chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. *Revue Forestière Française*, 58, 29-43.
- Lebourgeois, F., Cousseau, G., & Ducos, Y. (2004). Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the forest of Bercé ("Futaie des clos", Sarthe, France). *Ann. For. Sci.*, 61, 361-372.
- Lebourgeois, F. & Jabiol, B. (2002). Enracinement comparés du Chêne sessile, du Chêne pédonculé et du Hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française*, LIV (1-2002), 17-42.
- Lebourgeois, F., Spicher, F., & Lefèvre, Y. (2008). Relations croissance du Chêne pédonculé et climat sur deux types de sol à nappe temporaire en Lorraine (rédoxisol acide et pélosol différencié) *Revue Forestière Française*, LX (4), 411-424.
- Ledig, F.T. (1993). Genetics of oak species and the spectre of global climate change. *Ann. For. Sci.*, 50 (1), 456s-460s.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.
- Lévy, G., Lefèvre, Y., Becker, M., Frochot, H., Picard, J.F., & Wagner, P.A. (1999). Les excès d'eau : influence sur la croissance des chênes. *Revue Forestière Française*, LI (2), 151-161.
- Lucot, E., Badot, P.M., & Bruckert, S. (1995). Influence de l'humidité du sol et de distribution des racines sur le potentiel hydrique du xylème dans des peuplements de Chêne (*Quercus* sp) de basse altitude. *Ann. For. Sci.*, 52, 173-182.
- Lucot, E. & Bruckert, S. (1992). Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). *Ann. For. Sci.*, 49, 465-479.
- Malaisse, F., Burgeon, D., Degreef, J., Deom, B., & van Doren, B. (1993). Le dépérissement des chênes indigènes en Europe occidentale. *Belg. Journ. Bot.*, 126 (2).
- Maudoux, J.-P. (1993) Contribution À l'étude du dépérissement des chênes indigènes (*Quercus petraea* (Mattuscka) Lieblein et *Quercus robur* L.) : écologie et pathologie du système racinaire., pp. 93, v.p. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

- Maurel, M. (2001). *Impact écophysiological sur jeunes chênes et châtaigniers de l'infection racinaire par Phytophthora cinnamomi*. Doctorat, Université de Paris.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Misson, L., Rasse, D.P., Vincke, C., Aubinet, M., & François, L. (2002). Predicting transpiration from forest stands in Belgium for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111 (4), 265-282.
- Moortel, R.v., Rampelberg, S., & Deckers, J. (1998). Condition of *Quercus robur* L. along a natural Luvisol microtoposequence on loess in Central Belgium. *Soil Use and Management*, 14 (3), 184-186.
- Moraal, L.G. & Hilszczanski, J. (2000). The oak buprestid beetle, *Agrilus biguttatus* (F.) (Col., Buprestidae), a recent factor in oak decline in Europe. *Anzeiger für Schadlingskunde*, 73 (5), 134-138.
- Nebout, J.P. (2008). A propos des plantations mélangées de Chêne sessile, Pin laricio de Corse et Pin sylvestre. *Revue Forestière Française*, 60 (2), 279-288.
- Nizinski, J. & Saugier, B. (1989). Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en forêt de Fontainebleau. *Ann. For. Sci.*, 46, 173-186.
- Paoletti, E., Anselmi, N., & Franceschini, A. (2007). Pre-Exposure to Ozone Predisposes Oak Leaves to Attacks by *Diplodia corticola* and *Biscogniauxia mediterranea*. *The Scientific World Journal*, 7, 222-230.
- Parelle, J., Brendel, O., Jolivet, Y., & Dreyer, E. (2007). Intra- and interspecific diversity in the response to waterlogging of two co-occurring white oak species (*Quercus robur* and *Q. petraea*). 27, 1027-1034.
- Perin, J. & Claessens, H. (2009). Considérations sur la désignation et le détournement en chênes et hêtre. *Forêt wallonne*, 98, 39-52.
- Picon, C., Guehl, J.M., & Ferhi, A. (1996). Leaf gas exchange and carbon isotope composition responses to drought in a drought-avoiding (*Pinus pinaster*) and a drought-tolerant (*Quercus petraea*) species under present and elevated atmospheric CO₂ concentrations. *Plant, Cell & Environment*, 19, 182-190.
- Ponton, S., Dupouey, J.-L., Bréda, N., & Dreyer, E. (2002). Comparison of water-use efficiency of seedlings from two sympatric oak species: genotype × environment interactions. 22, 413-422.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecoq, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

- Rozas, V. (2001). Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain. *Ann. For. Sci.*, 58, 237-251.
- Rozas, V. (2005). Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. *Annals of Forest Science*, 62, 209-218.
- Schmull, M. & Thomas, F.M. (2000). Morphological and physiological reactions of young deciduous trees (*Quercus robur* L., *Q. petraea* [Matt.] Liebl., *Fagus sylvatica* L.) to waterlogging. *Plant and Soil*, 225, 227-242.
- Sevrin, E. (1997). *Les chênes sessile et pédonculé*, pp 96. Institut pour le développement forestier, Paris.
- Sioen, G. & Roskams, P. (2006). Crown condition of *Quercus robur* in Flanders (Belgium). *Symposium: Forest in a changing environment - Results of 20 years ICP Forest Monitoring* (band142), Göttingen. 210-215.
- Siwkcki, R. & Ufnalski, K. (1998). Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *Forest Pathology*, 28 (2), 99-112.
- Tessier, L., Nola, P., & Serre-Bachet, F. (1994). Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region: tree-ring/climate relationships. *New Phytologist*, 126, 355-367.
- Thomas, F.M. & Ahlers, U. (1999). Effects of excess nitrogen on frost hardiness and freezing injury of above-ground tissue in young oaks (*Quercus petraea* and *Q. robur*). *New Phytologist*, 144 (1), 73-83.
- Thomas, F.M., Blank, R., & Hartmann, G. (2002). Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology*, 32 (4-5), 277-307.
- Thomas, F.M. & Büttner, G. (1998). Nutrient relations in healthy and damaged stands of mature oaks on clayey soils: two case studies in northwestern Germany. *Forest Ecology and Management*, 108 (3), 301-319.
- Thomas, F.M. & Runge, M. (1992). Proton Neutralization in the Leaves of English Oak (*Quercus robur* L.) Exposed to Sulphur Dioxide. *J. Exp. Bot.*, 43 (6), 803-809.
- Timbal, J. & Aussenac, G. (1996). An overview of ecology and silviculture of indigenous oaks in France. *Ann. For. Sci.*, 53, 649-661.
- Triboulot, M.B., Fauveau, M.L., Bréda, N., Label, P., & Dreyer, E. (1996). Stomatal conductance and xylem-sap abscisic acid (ABA) in adult oak trees during a gradually imposed drought. *Ann. For. Sci.*, 53, 207-220.
- Vallet, P., Dhôte, J.-F., Le Moguédec, G., Ravart, M., & Pignard, G. (2006). Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 229, 98-110.

- van Hees, A.F.M. (1997). Growth and morphology of pedunculate oak (*Quercus robur* L) and beech (*Fagus sylvatica* L) seedlings in relation to shading and drought. *Ann. For. Sci.*, 54, 9-18.
- Vincke, C., Granier, A., Bréda, N., & Devillez, F. (2005). Evapotranspiration of a declining *Quercus robur* (L.) stand from 1999 to 2001. II. Daily actual evapotranspiration and soil water reserve. *Ann. For. Sci.*, 62, 615-623.
- Vivin, P., Aussenac, G., & Lévy, G. (1993). Differences in drought resistance among 3 deciduous oak species grown in large boxes. *Ann. For. Sci.*, 50, 221-233.
- Vivin, P., Guehl, J.-M., Clément, A., & Aussenac, G. (1996). The effects of elevated CO₂ and water stress on whole plant CO₂ exchange, carbon allocation and osmoregulation in oak seedlings. *Ann. For. Sci.*, 53, 447-459.
- Wagemans, C. (1994). *Etude de la croissance en hauteur d'un peuplement de chênes sessiles (Quercus petraea (Mattuschka) Lieblein) en relation avec les conditions topographiques*. Mémoire de fin d'études, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Wattenbach, M., Hattermann, F., Weng, R., Wechsung, F., Krysanova, V., & Badeck, F. (2005). A simplified approach to implement forest eco-hydrological properties in regional hydrological modelling. *Ecological Modelling*, 187, 40-59.
- Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991a). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.
- Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991b). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.
- Weissen, F., Bronchart, L., Piret, A., & Lambert, D. (1994). *Guide de boisement des stations forestières de Wallonie*, pp 175 p. Ministère de la Région Wallonne. Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Jambes.
- Weissen, F., van Praag, H.J., André, P., & Maréchal, P. (1992). Causes du dépérissement des forêts en Ardennes: observations et expérimentation. *Silva Belgica*, 99 (1), 9-13.

Chapitre 5. Extension de l'étude aux autres essences

Ce chapitre rassemble de l'information autécologique pour une série d'essences de production potentielles pour la forêt de Soignes.

La présentation a été conçue sous forme de fiches. Cependant, l'information autécologique est assez difficile à synthétiser et encore plus à valider pour la zone d'étude. Les sources sont multiples, de la vulgarisation d'études empiriques à la formulation de résultats d'études éco-physiologiques. Il n'a pas été possible, dans le cadre de cette convention, d'aller plus loin dans l'utilisation fine de cette information, comme il serait souhaitable de le faire.

Néanmoins, les informations qu'apportent la littérature ont été suffisantes pour notre approche empirique

Les essences traitées sont les suivantes :

- chêne rouge d'Amérique
- érable sycomore
- frêne commun
- charme
- merisier
- robinier
- bouleau verruqueux
- mélèze d'Europe
- mélèze du Japon
- mélèze hybride
- pin sylvestre
- pin de Corse
- pin d'Autriche
- pin de Koekelaere
- tilleul à petites feuilles
- tilleul à grandes feuilles
- chataîgner
- noyer commun
- noyer noir
- noyer hybride
- cèdre de l'Atlas
- cèdre du Liban
- cèdre de l'Himalaya

CHÊNE ROUGE D'AMÉRIQUE

Quercus rubra L.

Red oak

1. Température : moyenne annuelle & chaleur

Dans son aire d'origine, la température annuelle moyenne varie entre 4 et 15,5 °C, avec une moyenne de 11,5 °C. On estime son optimum à environ 13 °C (Kremer, 1986; Rameau et al., 1989; Timbal, 1990; Timbal et al., 1994). En Belgique, son maintien est plus aléatoire pour des moyennes en dessous de 7°C, cause en est le gel (Boudru, 1986).

Il supporte de fortes chaleurs estivales (Boudru, 1986).

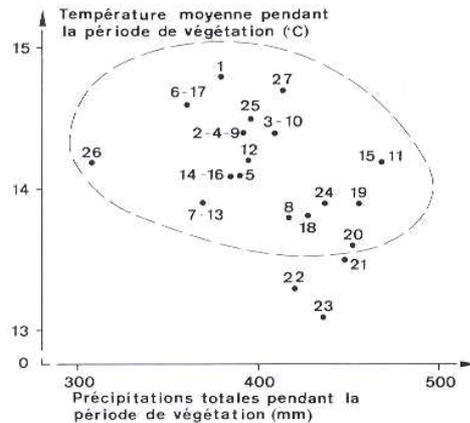
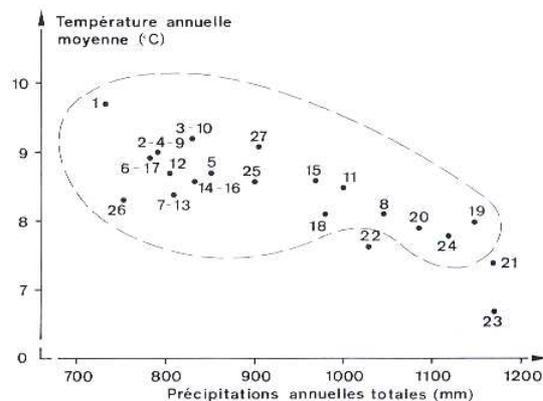
2. Température : froid

Il est également très résistant aux basses températures, mais les territoires avec présence de gel fréquent et basses température ne lui conviennent pas en Belgique (Boudru, 1986; Timbal, 1990; Timbal et al., 1994).

3. Régime hydrique : précipitations annuelles

Dans son aire naturelle, la précipitation annuelle moyenne varie entre 800 et 2000 mm, avec une moyenne de 1050 mm (Timbal et al., 1994). En France, on considère qu'il peut être utilisé avec succès entre 800 et 1200 mm (Kremer, 1986).

En Région wallonne, la Haute Ardenne, l'Ardenne centro-orientale et occidentale lui conviennent moins, voire pas du tout (Weissen et al., 1991b) :



4. Régime hydrique : épisodes secs

Il est peu sensible à la sécheresse, contrôlant bien sa transpiration et étant capable de produire des racines secondaires augmentant la prospection du sol (Bréda, 2004; Masson, 2005; Weissen et al., 1991b).

Il est même considéré comme plus tolérant à la sécheresse que le chêne sessile (Timbal et al., 1994).

5. Régime hydrique : engorgement temporaire

Les sols rédoxyques suivants lui conviennent (Jenner, 1993; Lévy & Lefevre, 2001; Quagneaux, 1994; Timbal et al., 1994) :

- sol sans trace d'hydromorphie à moins de 40 cm de profondeur ;
- hydromorphie pas trop marquée ;
- engorgement persistant peu au printemps.

La texture du sol ne doit être trop fine (limono-argileux ou argileux) car son développement est limité par l'excès d'eau en hiver et par l'importance de la sécheresse en été (Jenner, 1993; Lévy & Lefevre, 2001; Quagneaux, 1994; Timbal et al., 1994).

6. Compaction des sols

Ayant besoin d'une certaine aération, il supporte mal la compacité (dès la plantation) (Bourgerly & Castaner, 1988; Quagneaux, 1994; Timbal et al., 1994).

7. Pauvreté chimique

Point de vue pH, il peut valoriser des sols très acides à faiblement acides (pH de 3,5 à 7). L'optimum est

considéré à 5 - 5,5. Au-delà de 7, il est hors station (Boudru, 1986; Timbal et al., 1994).

Il possède de grande capacité à mettre en valeur des sols pauvres, même s'ils ne correspondent pas à son optimum (Boudru, 1986; Boudru et al., 1982; Timbal et al., 1994).

8. Vent

De part son système racinaire puissant, il possède une très bonne stabilité attestée par le faible nombre de chablis rencontré (Kremer, 1986; Timbal et al., 1994).

9. Neige

Le juvénile est sensible au givre et neige collante, pas l'adulte (Weissen et al., 1991b).

10. Facteurs biotiques

Dans son aire d'origine, le champignon *Ceratocystis fagacearum* est une maladie voisine de la graphiose de l'orme. Il n'a pas été observé en Europe, mais le principe de précaution est de mise (pas de peuplements purs trop grands, etc) (Masson, 2005).

En France, la maladie de l'encre du chêne rouge d'Amérique (champignon *Phytophthora cinnamomi*) déprécie la technologie du bois (Masson, 2005).

En Wallonie, les pathogènes suivants sont cités (Weissen et al., 1991b) : *Balaninus spp.* (Charançons), *Endothia parasitica* (Chancre), *Microsphaera alphitoïdes* (Oïdium), *Polypores div. sp.* (Pourriture blanche), *Tortrix viridana* (Tordeuse verte).

11. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

12. Ozone troposphérique

13. Retombées atmosphérique

14. Facteur âge

15. Bibliographie

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Boudru, M., Thill, A., & Roisin, P. (1982). Le chêne rouge d'Amérique (*Quercus borealis* Michx) en moyenne Belgique. *Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique*, 82-5 (1975), 249-273.

Bourgerie, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Jenner, X. (1993). Le Chêne rouge (*Quercus rubra* L.). Une essence feuillue productrice pour le reboisement des sols à dominante sableuse de la région Centre. Article tiré d'une étude intitulée " Le Chêne rouge d'Amérique en région Centre, autoécologie, productivité, sylviculture, qualité du bois " réalisée en 1991 *Forêt de France*, 367 (octobre 1993), 18-20.

Kremer, A. (1986). Le chêne rouge *Quercus rubra* L. *Revue Forestière Française*, Spécial (1986), 165-167.

Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Quagneaux, F. (1994). Le Chêne rouge d'Amérique *Quercus rubra*. *Forêt entreprise*, 95 (1994/1).

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Timbal, J. (1990). Le chêne rouge d'Amérique. Ecologie et facteurs limitants. *Revue Forestière Française*, 1990/2, 165-173.

Timbal, J., Kremer, A., Le Goff, N., & Nepveu, G. (1994). *Le chêne rouge d'Amérique*. INRA. pp 564, Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

16. Ouvrages consultés

Arbogast, M. (1992). L'érable à fibres ondulés : ressources, critères de reconnaissance. *Revue Forestière Française*, Spécial, 160-175.

Armand, G. (1995). *Feuillus précieux : Conduite des plantations en ambiance forestière - Merisier, érable sycomore, frêne, chêne rouge d'Amérique*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 112.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Aussenac, G. & Lévy, G. (1992). Les exigences en eau du Frêne (*Fraxinus excelsior* L.). *Revue Forestière Française*, 44 (numéro spécial), 32-38.

Bartoli, M. & Dumas, J.-M. (1994). Le Mélèze d'Europe dans les Pyrénées. *Revue Forestière Française*, 1994/3, 235-238.

Bastien, J.-C. & Keller, R. (1980). Intérêts comparés du mélèze hybride (*Larix x eurolepis* Henry) avec les deux espèces parentes. *Revue Forestière Française*, 32 (6), 521-530.

Becquey, J. (1992). IDF - Les plantations de feuillus précieux. D'abord éviter les erreurs. *Forêt entreprise*, 81 (1/1992), 33.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Boudru, M., Thill, A., & Roisin, P. (1982). Le chêne rouge d'Amérique (*Quercus borealis* Michx) en moyenne Belgique. *Bulletin de la Société Royale Forestière de Belgique*, 82-5 (1975), 249-273.

Boulet-Gercourt, B. (1998). *Le merisier*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 128, Paris.

Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Catry, B. & Poulain, G. (1993). Le Merisier en Nord-Pas-de-Calais-Picardie. *Forêt entreprise*, 91 (4/1993).

Claessens, H., Thibaut, A., & Rondeux, J. (2002). Itinéraires sylvicoles pour la production de frêne de qualité. *Cahiers Forestiers de Gembloux* (20)17 p.

Claessens, H., Thibaut, A., & Rondeux, J. (2008). *Autécologie du merisier*. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux & Division de la Nature et des Forêts

- Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement - Ministère de la Région Wallonne, Gembloux.

Clauce, F., Fleisch, M.-R., & Van Landeghem, S. (1998). Le dépérissement du merisier en région Nord-Pas-de-Calais-Picardie - Picardie *Forêt entreprise*, 120/1998, 50-53.

Danduy des Déserts, D., De la Broise, P., & Souleres, G. (1990). Les dégâts de l'ouragan des 15 et 16 octobre 1987 sur la forêt bretonne. *Revue Forestière Française*, 1990/6, 603-612.

Delannoy, E., Luisetti, J., Vigouroux, A., & De Vilbonne, D. (1997). Problèmes sanitaires des plantations artificielles de Merisier - Recommandations. *Forêt entreprise*, 107, 19-21.

Doll, D. & Riou-Nivert, P. (1991). Dossier spécial tempêtes - Les Chablis en Europe : courons-nous au désastre ? *Forêt entreprise*, 77 (1991/5), 10.

Fernandez, R., Santi, F., & Dufour, J. (1994). Les matériels de reproduction sélectionnés du Merisier (*Prunus avium* L.) : classement, provenances et variabilités. *Revue Forestière Française*, 1994/6, 629-637.

Fourbisseur, A., Charron, S., Jourez, B., & Hébert, J. (2003). Le point sur la place du Robinier en Hongrie. *Forêt Wallonne*, 67 (Novembre-2003), 26-31.

Franc, A., Bolchert, C., & Marzolf, G. (1992). Les exigences stationnelles du merisier : revue bibliographique. *Revue Forestière Française*, 44 (numéro spécial), 27-31.

Franc, F. & Ruchaud, F. (1996). *Autécologie des feuillus précieux: frêne commun, merisier, érable sycomore, érable plane*. Cemagref Editions. pp 170, France.

Garsault, J.-F. (1993). Des maladies foliaires du Merisier favorisées par les pluies. *La santé des Forêts* (1993), France. 30 p.

Gielen, C. (2000). *Etude des potentiabilités des bouleaux (*Betula pendula* Roth et *Betula pubescens* Ehrh.)*. Mémoire de fin d'études, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.

Hubert, M. (1980). *Le merisier, arbre à bois*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 56, Paris.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

Jacamon, M. (1984a). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.

Jacamon, M. (1984b). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.

Jenner, X. (1993). Le Chêne rouge (*Quercus rubra* L.). Une essence feuillue productrice pour le reboisement des sols à dominante sableuse de la région Centre. Article tiré d'une étude intitulée " Le Chêne rouge d'Amérique en région Centre, autoécologie, productivité, sylviculture, qualité du bois " réalisée en 1991 *Forêt de France*, 367 (octobre 1993), 18-20.

- Keller, R. (1992). Les bois des grands érables : états des connaissances, facteurs de variabilité, aptitudes technologiques. *Revue Forestière Française*, Spécial, 133-141.
- Kremer, A. (1986). Le chêne rouge *Quercus rubra* L. *Revue Forestière Française*, Spécial (1986), 165-167.
- Lévy, G., Le Goff, N., Lefèvre, Y., & Garros, L. (1992). Les exigences stationnelles du frêne dans le Nord et le Nord-Est de la France. *Revue Forestière Française*, 44, 20-26.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Mirault, J. & Regad, J. (1992). Les dessèchements de rameaux du mélèze d'Europe. *La santé des forêts* (1992), France. 38.
- Nageleisen, L.-M. (1994). Le dépérissement actuel des feuillus divers: hêtre, merisier, alisier torminal, érable sycomore, peuplier, châtaignier, charme, aulne glutineux. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 554-562.
- Nepveu, G. (1992). L'utilisation des bois de frêne et de merisier : aptitudes technologiques, facteurs de variabilité. *Revue Forestière Française*, 1992 Spécial, 142-149.
- Ningre, F., Cluzeau, C., & Le Goff, N. (1992). La fourchaison du Frêne en plantation : conséquences et contrôle. *Revue Forestière Française*, 1992 Spécial, 104-114.
- Picard, J.-F. & Vernier, M. (1989). L'arboretum d'Amance (Meurthe-et-Moselle). *Revue Forestière Française*, 1989/3, 179-204.
- Pilard-Landeau, B. & Le Goff, N. (1996). Sylviculture du frêne. *Bulletin technique ONF* (31)9-14.
- Poulain, G. (1992). L'érable sycomore (en Nord-Pas-de-Calais-Picardie). *Forêt de France*, 356 (août-septembre), 21-23.
- Quagneaux, F. (1994). Le Chêne rouge d'Amérique *Quercus rubra*. *Forêt entreprise*, 95 (1994/1).
- Raguin, F. & Boulet-Gercourt, B. (1997). Groupe de travail - Merisier : de nouvelles ambitions. *Forêt entreprise*, 118, 12-13.
- Rameau, J.-C. (1992). Dynamique de la végétation à l'étage montagnard des Alpes du Sud. Première approche d'une typologie des hêtraies et hêtraies-sapinières. Les applications possible au niveau de la gestion. *Revue Forestière Française*, 5, 393-413.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Riou-Nivert, P. (2001). *Le mélèze*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 144, Paris.

Timbal, J. (1990). Le chêne rouge d'Amérique. Ecologie et facteurs limitants. *Revue Forestière Française*, 1990/2, 165-173.

Timbal, J., Kremer, A., Le Goff, N., & Nepveu, G. (1994). *Le chêne rouge d'Amérique*. INRA. pp 564, Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991a). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991b). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991c). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Wilhelm, G.-J. & Raffel, D. (1993). La sylviculture du mélange temporaire Hêtre - Merisier sur le plateau lorrain. *Revue Forestière Française*, 1993-6, 651-658.

ÉRABLE SYCOMORE

Acer pseudoplatanus L.

Sycamore maple

17. Température : moyenne annuelle & chaleur

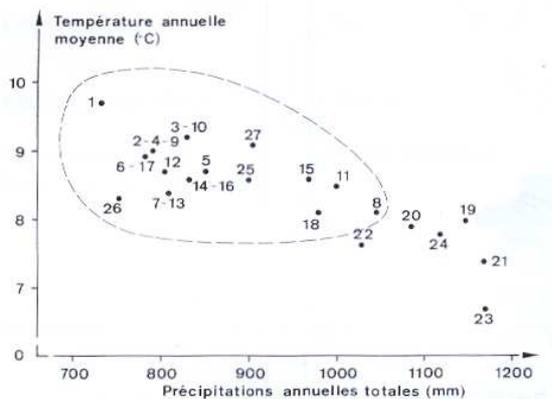
Il se retrouve dans les zones à température moyenne annuelle assez fraîche : de 6,5 à 10°C (Armand, 1995; Boudru, 1986; Jacamon, 1984b; Masson, 2005; Poulain, 1992; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993). Il supporte les chaleurs estivales à condition d'avoir une bonne alimentation en eau. Dans le cas contraire, il est pré-disposé à la « maladie de la suie de l'érable sycomore » (Meier et al., 2004).

18. Température : froid

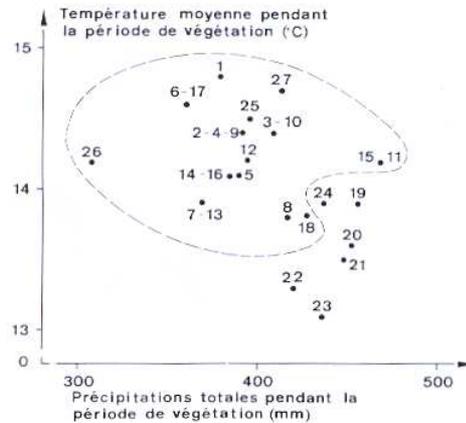
Il possède une grande résistance au froid, jusqu'à -28°C sans dommage (Masson, 2005). Il est résistant aux gelées tardives (Masson, 2005; Weissen et al., 1991b).

19. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il est jugé relativement plastique par Masson (Masson, 2005). Le graphe suivant avec données extraites en Région wallonne le confirme (Weissen et al., 1991b) :



Dans le même ordre d'idée, mais ne s'intéressant qu'à la période de végétation (Weissen et al., 1991b) :



20. Régime hydrique : épisodes secs

Il demande une réserve en eau utile (mm) du sol importante (Rameau, 1992). Par rapport aux prévisions 2100, il ne pourra subsister que si l'alimentation en eau est bonne tout au long de l'année, pour compenser un manque d'humidité atmosphérique (Arbogast, 1992; Armand, 1995; Becquey, 1992; Poulain, 1992; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

21. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il est sensible à un engorgement temporaire. S'il se situe à moins de 50 cm de profondeur, il contrarie la croissance de l'arbre (Armand, 1995; IDF, 1990; Keller, 1992).

22. Compaction des sols

Il est aussi sensible au manque d'aération du sol qu'à une porosité excessive (IDF, 1990; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

23. Pauvreté chimique

Point de vue pH, on le rencontre dans une fourchette de 4 à 8. Cependant, l'optimum se situe à 6-7. D'un point de vue sylvicole, les sols (podzoliques) à pH inférieurs à 5,5 sont à éviter (Arbogast, 1992; Armand, 1995; IDF, 1990; Keller, 1992; Poulain, 1992; Rameau et al., 1989).

24. Vent

Il est insensible au vent de part un enracinement puissant et la conformation de son houppier (Arbogast, 1992; Aussenac & Guehl, 1994; Boudru, 1986; IDF, 1990).

25. Neige

Il est peu sensible au givre et neige collante (Weissen et al., 1991b).

26. Facteurs biotiques

La *suié de l'érable sycomore* est une maladie corticale (champignon : *Cryptostroma corticale*). D'après la littérature anglaise, elle se manifeste préférentiellement si la température mensuelle de juin, juillet ou août dépasse les 23°C (Meier et al., 2004).

Sont également signalés en Région wallonne (Weissen et al., 1991b) :

- a. *Cochenilles div. Sp.* (en ville)
- b. *Eupulvinaria hydrangeae* (en ville)
- c. *Polypores div. Sp.* (arbres âgés)
- d. *Rhytisma acerinum* (Maladie des croûtes noires)

27. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

28. Ozone troposphérique

29. Retombées atmosphérique

Il est résistant au Dioxyde de soufre (SO₂) (Masson, 2005).

30. Facteur âge

31. Bibliographie

- Arbogast, M. (1992). L'érable à fibres ondulés : ressources, critères de reconnaissance. *Revue Forestière Française*, Spécial, 160-175.
- Armand, G. (1995). *Feuillus précieux : Conduite des plantations en ambiance forestière - Merisier, érable sycomore, frêne, chêne rouge d'Amérique*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 112.
- Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.
- Becquey, J. (1992). IDF - Les plantations de feuillus précieux. D'abord éviter les erreurs. *Forêt entreprise*, 81 (1/1992), 33.
- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Keller, R. (1992). Les bois des grands érables : états des connaissances, facteurs de variabilité, aptitudes technologiques. *Revue Forestière Française*, Spécial, 133-141.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Poulain, G. (1992). L'érable sycomore (en Nord-Pas-de-Calais-Picardie). *Forêt de France*, 356 (août-septembre), 21-23.
- Rameau, J.-C. (1992). Dynamique de la végétation à l'étage montagnard des Alpes du Sud. Première approche d'une typologie des hêtraies et hêtraies-sapinières. Les applications possible au niveau de la gestion. *Revue Forestière Française*, 5, 393-413.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecoïnte, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

32. Ouvrages consultés

Akatov, P.V. (2009). Changes in the Upper Limits of Tree Species Distribution in the Western Caucasus (Belaya River Basin) Related to Recent Climate Warming. *Russian Journal of Ecology*, 40 (1), 33-38.

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.

Barnett, D., Brown, S., Murphy, J., Sexton, D., & Webb, M. (2006). Quantifying uncertainty in changes in extreme event frequency in response to doubled CO₂ using a large ensemble of GCM simulations. *Climate Dynamics*, 26 (5), 489-511.

Battipaglia, G., Saurer, M., Cherubini, P., Siegwolf, R.T.W., & Cotrufo, M.F. (2009). Tree rings indicate different drought resistance of a native (*Abies alba* Mill.) and a nonnative (*Picea abies* (L.) Karst.) species co-occurring at a dry site in Southern Italy. *Forest Ecology and Management*, 257 (3), 820-828.

Bourgerie, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Broadmeadow, M.S.J., Ray, D., & Samuel, C.J.A. (2005). Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry*, 78 (2), 145-161.

Claessens, H., Pauwels, D., Thibaut, A., & Rondeux, J. (1999). Site index curves and autecology of ash, sycamore and cherry in Wallonia (Southern Belgium). *Forestry*, 72 (3), 171-182.

Coudun, C., Gégout, J.-C., Piedallu, C., & Rameau, J.-C. (2006). Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with *Acer campestre* (L.) in France. *Journal of Biogeography*, 33, 1750-1763.

- Daas, C., Montpied, P., Hanchi, B., & Dreyer, E. (2008). Responses of photosynthesis to high temperatures in oak saplings assessed by chlorophyll-a fluorescence: inter-specific diversity and temperature-induced plasticity. *Ann. For. Sci.*, 65, 305-312.
- Desprez-Lousteau, M.-L., Marçais, B., Nageleisen, L.-M., Piou, D., & Vannini, A. (2006). Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Ann. For. Sci.*, 63, 597-612.
- Dockerty, T., Lovett, A., & Watkinson, A. (2003). Climate change and nature reserves: examining the potential impacts, with examples from Great Britain. *Global Environmental Change*, 13 (2), 125-135.
- Franc, F. & Ruchaud, F. (1996). *Autécologie des feuillus précieux: frêne commun, merisier, érable sycomore, érable plane*. Cemagref Editions. pp 170, France.
- Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Reaftoyannis, Y., Savill, P.S., & Brus, R. Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *NOT YET PUBLISHED*.
- Kocher, P., Gebauer, T., Horna, V., & Leuschner, C. (2009). Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. *Ann. For. Sci.*, 66, 101-112.
- Landmann, G. (2002). La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 54 (4), 375-388.
- Lischke, H. (2005). Modeling tree species migration in the Alps during the Holocene: What creates complexity? *Ecological Complexity*, 2 (2), 159-174.
- Nagel, T.A., Levanic, T., & Diacia, J. (2007). A dendroecological reconstruction of disturbance in an old-growth Fagus-Abies forest in Slovenia. *Ann. For. Sci.*, 64, 891-897.
- Nageleisen, L.-M. (1994). Le dépérissement actuel des feuillus divers: hêtre, merisier, alisier torminal, érable sycomore, peuplier, châtaignier, charme, aulne glutineux. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 554-562.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Paillet, Y., Archaux, F., Breton, V., & Brun, J.-J. (2008). A quantitative assessment of the ecological value of sycamore maple habitats in the French Alps. *Ann. For. Sci.*, 65, 713-724.
- Pryor, S., Barthelmie, R., & Kjellström, E. (2005). Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. *Climate Dynamics*, 25 (7), 815-835.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J.P., & Menzel, A. (2006). Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Ann. For. Sci.*, 63, 569-577.
- Seidl, R., Rammer, W., Jäger, D., & Lexer, M.J. (2008). Impact of bark beetle (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different

management strategies under climate change. *Forest Ecology and Management*, 256 (3), 209-220.

Thibaut, A. (2004). Autécologie du merisier et de l'érable sycomore en région wallonne. *Forêt Wallonne*, 73 (6), 40-47.

Thill, A. (1975). La sylviculture des feuillus dits secondaires. *Note Technique* (27), Gembloux, Faculté des Sciences Agronomiques, Centre d'Ecologie forestière et rurale, I.R.S.I.A. 12 p.

Thill, A. & Mathy, P. (1980). La culture des essences précieuses en Belgique. *Ann. Gembloux* (86)1-32.

Thomas, F.M. & Büttner, G. (1998). Nutrient relations in healthy and damaged stands of mature oaks on clayey soils: two case studies in northwestern Germany. *Forest Ecology and Management*, 108 (3), 301-319.

Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.

Vitasse, Y., Delzon, S., Dufrene, E., Pontailier, J.Y., Louvet, J.M., Kremer, A., & Michalet, R. (2009). Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (5), 735-744.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif.*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Yamanaka, T., Tatsuki, S., & Shimada, M. (2008). Adaptation to the new land or effect of global warming? An age-structured model for rapid voltinism change in an alien lepidopteran pest. *Journal of Animal Ecology*, 77 (3), 585-596.

FRÊNE COMMUN*Fraxinus excelsior L.**Common ash***33. Température : moyenne annuelle & chaleur**

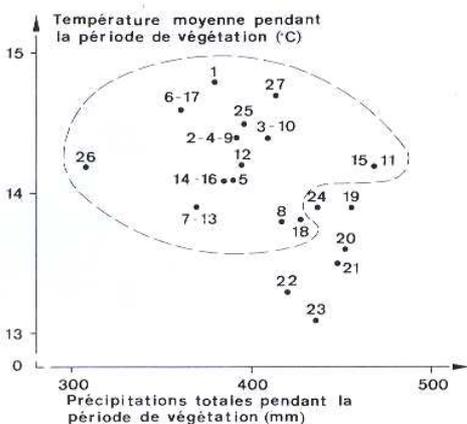
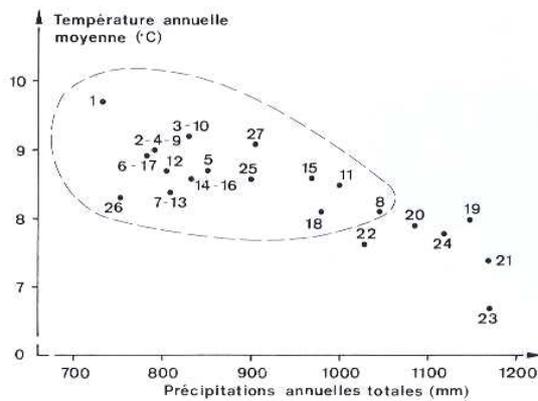
Il peut connaître un dépérissement s'il est soumis à de trop fortes températures estivales (Nageleisen, 1994).

34. Température : froid

Il résiste sans dommage à des températures hivernales allant jusqu'à $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$, même $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Aussenac & Guehl, 1994; Bourgerly & Castaner, 1988; IDF, 1990; Ningre et al., 1992).

35. Régime hydrique : précipitations annuelles

Vu ses exigences hydriques, le frêne demande une pluviosité abondante (Masson, 2005). Il résiste mal à la sécheresse atmosphérique. Concernant la Région wallonne, les graphes *température-pluviosité* sont les mêmes que pour l'érable sycomore (Weissen et al., 1991a) :

**36. Régime hydrique : épisodes secs**

A l'optimum, il doit bénéficier en permanence d'une importante réserve en eau utile (Aussenac & Lévy, 1992; Bréda, 2004; Rameau, 1992). Différents cas remplissent cette condition : une nappe permanente à relativement faible profondeur, une topographie favorable, une texture compatible.

37. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il demande une bonne alimentation en eau mais également un bon drainage. Il supporte un engorgement temporaire avec une eau aérée, mais de manière générale n'est pas à favoriser sur sols à nappe temporaire (Lévy & Lefevre, 2001).

38. Compaction des sols

Essence relativement sensible à la compacité et l'anaérobiose, le frêne supporte mal une compaction dans les 60-70 premiers centimètres du sol (Claessens et al., 2002; IDF, 1990; Pilard-Landeau & Le Goff, 1996; Weissen et al., 1991a).

39. Pauvreté chimique

Quand le pH est inférieur à 5,5, les arbres sont fréquemment chancreux. L'optimum se situe à 6,5 (Armand, 1995; Aussenac & Lévy, 1992; Becquey, 1992; Pilard-Landeau & Le Goff, 1996; Rameau et al., 1993).

Son optimum se situe sur des sols riches en bases. C'est également un grand consommateur d'azote sous forme nitrique (Lévy et al., 1992; Nepveu, 1992; Pilard-Landeau & Le Goff, 1996; Rameau et al., 1993).

40. Vent

De part son enracinement oblique, il peu sensible au chablis, mais subit par contre une déformation du houppier (Aussenac & Guehl, 1994; Boudru, 1986; IDF, 1990).

41. Neige

Il est peu sensible au givre et neige collante (Weissen et al., 1991a).

42. Facteurs biotiques

Les champignons suivants (Weissen et al., 1991a) :

- a. Polypores (*Inonotus hispidus*) sur sols secs et à un âge avancé.
- b. *Pseudomonas savastanoi* dans les peuplements trop denses sur stations trop sèches, trop humides, froides (fonds de vallée).

Les insectes suivants (Weissen et al., 1991a) :

- La Teigne (*Coleophora curtisella*) provoque une bifurcation des pousses.
- *Lesperesinus varius* attaque l'écorce d'individus affaiblis.
- Etc

43. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

44. Ozone troposphérique

45. Retombées atmosphérique

46. Facteur âge

47. Bibliographie

- Armand, G. (1995). *Feuillus précieux : Conduite des plantations en ambiance forestière - Merisier, érable sycomore, frêne, chêne rouge d'Amérique*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 112.
- Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.
- Aussenac, G. & Lévy, G. (1992). Les exigences en eau du Frêne (*Fraxinus excelsior* L.). *Revue Forestière Française*, 44 (numéro spécial), 32-38.
- Becquey, J. (1992). IDF - Les plantations de feuillus précieux. D'abord éviter les erreurs. *Forêt entreprise*, 81 (1/1992), 33.
- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.
- Claessens, H., Thibaut, A., & Rondeux, J. (2002). Itinéraires sylvicoles pour la production de frêne de qualité. *Cahiers Forestiers de Gembloux* (20)17 p.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Lévy, G., Le Goff, N., Lefèvre, Y., & Garros, L. (1992). Les exigences stationnelles du frêne dans le Nord et le Nord-Est de la France. *Revue Forestière Française*, 44, 20-26.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Nageleisen, L.-M. (1994). Le dépérissement actuel des feuillus divers: hêtre, merisier, alisier torminal, érable sycomore, peuplier, châtaignier, charme, aulne glutineux. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 554-562.
- Nepveu, G. (1992). L'utilisation des bois de frêne et de merisier : aptitudes technologiques, facteurs de variabilité. *Revue Forestière Française*, 1992 Spécial, 142-149.

Ningre, F., Cluzeau, C., & Le Goff, N. (1992). La fourchaison du Frêne en plantation : conséquences et contrôle. *Revue Forestière Française*, 1992 Spécial, 104-114.

Pilard-Landeau, B. & Le Goff, N. (1996). Sylviculture du frêne. *Bulletin technique ONF* (31)9-14.

Rameau, J.-C. (1992). Dynamique de la végétation à l'étage montagnard des Alpes du Sud. Première approche d'une typologie des hêtraies et hêtraies-sapinières. Les applications possible au niveau de la gestion. *Revue Forestière Française*, 5, 393-413.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

48. Ouvrages consultés

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

Aussenac, G. & Lévy, G. (1983). Influence du dessèchement du sol sur le comportement hydrique et la croissance du chêne pédonculé (*Quercus pedunculata* Ehrl.) et du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) cultivés en cases de végétation. *Ann. For. Sci.*, 40 (3), 251-264.

Broadmeadow, M.S.J. & Jackson, S.B. (2000). Growth responses of *Quercus petraea*, *Fraxinus excelsior* and *Pinus sylvestris* to elevated carbon dioxide, ozone and water supply. *New Phytologist*, 146 (3), 437-451.

Broadmeadow, M.S.J., Ray, D., & Samuel, C.J.A. (2005). Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry*, 78 (2), 145-161.

Claessens, H., Pauwels, D., Thibaut, A., & Rondeux, J. (1999). Site index curves and autecology of ash, sycamore and cherry in Wallonia (Southern Belgium). *Forestry*, 72 (3), 171-182.

Claessens, H., Thibaut, A., Lecomte, H., Delecour, F., Rondeux, J., & Thill, A. (1994). *Le frêne en Condroz - stations et productivité potentielles*. IRSIA. pp 119. Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Bruxelles.

- Claessens, H., Thibaut, A., & Rondeux, J. (1993). Facteurs écologiques de production du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en Condroz et productivité des stations potentielles. *Cahiers Forestiers de Gembloux* (11)26 p.
- Duflot, H. (1995). *Le frêne en liberté*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 192, Paris.
- Eglin, T., Walter, C., Nys, C., Follain, S., Forgeard, F., Legout, A., & Squividant, H. (2008). Influence of waterlogging on carbon stock variability at hillslope scale in a beech forest (Fougères forest – West France). *Ann. For. Sci.*, 65, 202-212.
- Ferrazzini, D., Monteleone, I., & Belletti, P. (2007). Genetic variability and divergence among Italian populations of common ash (*Fraxinus excelsior* L.). *Ann. For. Sci.*, 64, 159-168.
- Franc, F. & Ruchaud, F. (1996). *Autécologie des feuillus précieux: frêne commun, merisier, érable sycomore, érable plane*. Cemagref Editions. pp 170, France.
- Gebauer, T., Horna, V., & Leuschner, C. (2008). Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiology*, 28 (12), 1821-1830.
- Gérard, P.R., Fernandez-Manjarrés, J.F., Bertolino, P., Dufour, J., Raquin, C., & Frascaria-Lacoste, N. (2006). New insights in the recognition of the European ash species *Fraxinus excelsior* L. and *Fraxinus angustifolia* Vahl as useful tools for forest management. *Ann. For. Sci.*, 63, 733-738.
- Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Reaftoyannis, Y., Savill, P.S., & Brus, R. Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *NOT YET PUBLISHED*.
- Herbst, M., Roberts, J.M., Rosier, P.T.W., Taylor, M.E., & Gowing, D.J. (2007). Edge effects and forest water use: A field study in a mixed deciduous woodland. *Forest Ecology and Management*, 250 (3), 176-186.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Karnosky, D.F. (2003). Impacts of elevated atmospheric CO₂ on forest trees and forest ecosystems: knowledge gaps. *Environment International*, 29 (2-3), 161-169.
- Kazda, M., Salzer, J., & Reiter, I. (2000). Photosynthetic capacity in relation to nitrogen in the canopy of a *Quercus robur*, *Fraxinus angustifolia* and *Tilia cordata* flood plain forest. 20, 1029-1037.
- Kocher, P., Gebauer, T., Horna, V., & Leuschner, C. (2009). Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. *Ann. For. Sci.*, 66, 101-112.

- Le Goff, N. & Levy, G. (1984). Productivité du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région Nord-Picardie. B. Etude des relations entre la productivité et les conditions de milieu. *Annales des Sciences Forestières*, 41 (2), 135-170.
- Matyssek, R., Bytnerowicz, A., Karlsson, P.E., Paoletti, E., Sanz, M., Schaub, M., & Wieser, G. (2007). Promoting the O₃ flux concept for European forest trees. *Environmental Pollution*, 146 (3), 587-607.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Misson, L., Rasse, D.P., Vincke, C., Aubinet, M., & François, L. (2002). Predicting transpiration from forest stands in Belgium for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111 (4), 265-282.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Thibaut, A., Claessens, H., & Rondeux, J. (1992). Etablissement de courbes de productivité pour les peuplements de frêne (*Fraxinus excelsior* L.) en région limono-calcaire du Condroz et de l'Entre-Sambre-et-Meuse *Cahiers Forestiers de Gembloux* (7)20 p.
- Thill, A. (1970). *Le frêne et sa culture*. Presses Agronomiques de Gembloux. pp 85, Gembloux.
- Thill, A. (1975). La sylviculture des feuillus dits secondaires. *Note Technique* (27), Gembloux, Faculté des Sciences Agronomiques, Centre d'Ecologie forestière et rurale, I.R.S.I.A. 12 p.
- Thill, A. (1987). Exemple de frênaie naturelle en voie d'évolution vers une érablière. *Note Technique* (56), Gembloux, Faculté des Sciences Agronomiques, Centre d'Ecologie forestière et rurale, I.R.S.I.A. 12 p.
- Thill, A. & Mathy, P. (1980). La culture des essences précieuses en Belgique. *Ann. Gembloux* (86)1-32.
- Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.
- Vitasse, Y., Delzon, S., Dufrêne, E., Pontailier, J.-Y., Louvet, J.-M., Kremer, A., & Michalet, R. (2009). Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (5), 735-744.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Wiltshire, J.J.J., Unsworth, M.H., & Wright, C.J. (1994). Seasonal-Changes in Water-Use of Ash Trees Exposed to Ozone Episodes. *New Phytologist*, 127 (2), 349-354.

CHARME

Carpinus betulus L.

European horn beam

49. Température : moyenne annuelle & chaleur

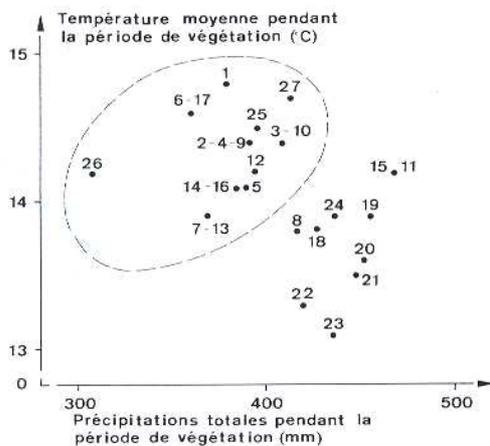
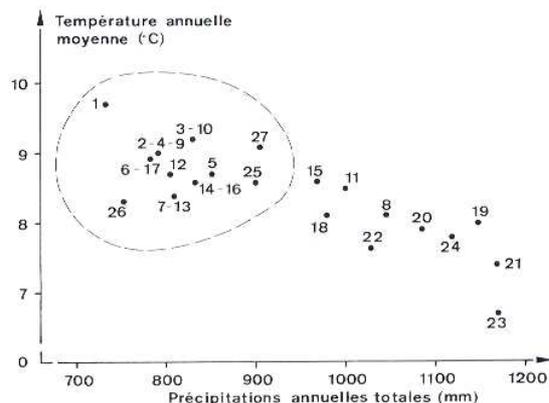
Le maximum critique est renseigné à + 40 °C (Weissen et al., 1991b).

50. Température : froid

Le minimum critique est renseigné à – 29 °C (Weissen et al., 1991b).

51. Régime hydrique : précipitations annuelles

Du point de vue couple températures-précipitations en Région wallonne, on observe une limitation due aux précipitations annuelles, mais également à cause de la luminosité (Weissen et al., 1991b).



52. Régime hydrique : épisodes secs

C'est une essence peu sensible à la sécheresse (Weissen et al., 1991b). Des mesures lors de la canicule de 2003 ont mis en évidence un stress (fonction de la valeur du potentiel hydrique de base foliaire) bien moindre que celui du hêtre, se rapprochant du chêne sessile (Bréda, 2004).

53. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il est sensible à l'anaérobiose (Weissen et al., 1991b).

54. Compaction des sols

Il est peu sensible à la compacité (Weissen et al., 1991b).

55. Pauvreté chimique

Essence mésophile à large amplitude et large amplitude trophique, il « évolue » bien dans des gammes de pH situés entre 4,5 et 7,5. Il peut supporter un pH jusqu'à 4 (Weissen et al., 1991b).

56. Vent

Il est peu sensible sur stations venteuses (Weissen et al., 1991b).

57. Neige

L'adulte est sensible au givre et aux neiges collantes (Weissen et al., 1991b).

58. Facteurs biotiques

Insecte : Lépidoptères, *Geometridae*, les chenilles arpeuteuses qui s'attaquent aux feuilles (Weissen et al., 1991b).

59. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

60. Ozone troposphérique

61. Retombées atmosphérique

62. Facteur âge

63. Bibliographie

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

64. Ouvrages consultés

Andric, M., Kroflic, B., Toman, M.J., Ogrinc, N., Dolenc, T., Dobnikar, M., & Cermelj, B. (2008). Late quaternary vegetation and hydrological change at Ljubljansko barje (Slovenia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 270 (1-2), 150-165.

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourger, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.*, 63, 625-644.

Broadmeadow, M.S.J., Ray, D., & Samuel, C.J.A. (2005). Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry*, 78 (2), 145-161.

- Brzniecki, B. (1994). Modelling potential impacts of global climatic change on forest ecosystems. *Sylvan*, 138 (10), 5-21.
- Calfapietra, C., Fares, S., & Loreto, F. (2009). Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone. *Environmental Pollution*, 157 (5), 1478-1486.
- Chuine, I., Cour, P., & Rousseau, D.D. (1999). Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: implications for tree phenology modelling. *Plant Cell and Environment*, 22 (1), 1-13.
- Daas, C., Montpied, P., Hanchi, B., & Dreyer, E. (2008). Responses of photosynthesis to high temperatures in oak saplings assessed by chlorophyll-a fluorescence: inter-specific diversity and temperature-induced plasticity. *Ann. For. Sci.*, 65, 305-312.
- Eglin, T., Walter, C., Nys, C., Follain, S., Forgeard, F., Legout, A., & Squividant, H. (2008). Influence of waterlogging on carbon stock variability at hillslope scale in a beech forest (Fougères forest – West France). *Ann. For. Sci.*, 65, 202-212.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Ishizuka, S., Sakata, T., Sawata, S., Ikeda, S., Takenaka, C., Tamai, N., Sakai, H., Suimizu, T., Kan-Na, K., Onodera, S.-i., Tanaka, N., & Takahashi, M. (2005). High potential for increase in CO₂ flux from forest soil surface due to global warming in cooler areas of Japan. *Annals of Forest Science*, 63, 537-546.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Kocher, P., Gebauer, T., Horna, V., & Leuschner, C. (2009). Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. *Ann. For. Sci.*, 66, 101-112.
- Kreuzwieser, J., Rennenberg, H., & Steinbrecher, R. (2006). Impact of short-term and long-term elevated CO₂ on emission of carbonyls from adult *Quercus petraea* and *Carpinus betulus* trees. *Environmental Pollution*, 142 (2), 246-253.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.
- Lexer, M.J., Hönninger, K., Scheifinger, H., Matulla, C., Groll, N., Kromp-Kolb, H., Schadauer, K., Starlinger, F., & Englisch, M. (2002). The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 162 (1), 53-72.
- Lischke, H. (2005). Modeling tree species migration in the Alps during the Holocene: What creates complexity? *Ecological Complexity*, 2 (2), 159-174.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Nageleisen, L.-M. (1994). Le dépérissement actuel des feuillus divers: hêtre, merisier, alisier torminal, érable sycomore, peuplier, châtaignier, charme, aulne glutineux. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 554-562.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruga, L., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2007). Phenological investigations of different winter-deciduous species growing under Mediterranean conditions. *Ann. For. Sci.*, 64, 557-568.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J.P., & Menzel, A. (2006). Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Ann. For. Sci.*, 63, 569-577.
- Rouault, G., Candau, J.-N., Lieuter, F., Nageleisen, L.-M., Martin, J.-C., & Warzée, N. (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.*, 63, 613-624.
- Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.
- Vitasse, Y., Delzon, S., Dufrene, E., Pontailier, J.Y., Louvet, J.M., Kremer, A., & Michalet, R. (2009). Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (5), 735-744.

MERISIER

Prunus avium (L.) L.

Wild cherry

65. Température : moyenne annuelle & chaleur

En France, le merisier est bien répandu sauf dans les régions trop chaudes méditerranéennes. La fourchette des températures moyennes annuelles est estimée entre 8 et 11 °C (Armand, 1995; Boulet-Gercourt, 1998; Catry & Poulain, 1993; Franc et al., 1992; Wilhelm & Raffel, 1993).

La chaleur lui est favorable : en Wallonie, il demande une température moyenne durant la saison de végétation supérieure à 14 °C (Catry & Poulain, 1993; Claessens et al., 2008; Franc et al., 1992; Franc & Ruchaud, 1996).

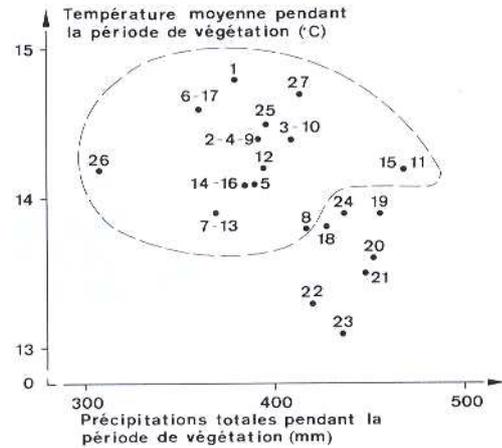
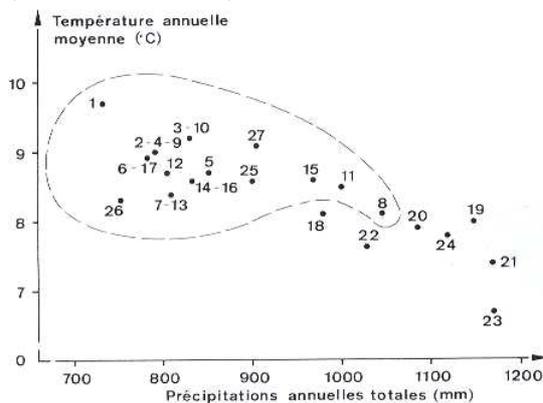
66. Température : froid

Il supporte bien le froid, des dégâts apparaissent toutefois à des températures de – 26 à –27 °C (hiver 79-80) (Boudru, 1986; Boulet-Gercourt, 1998; Catry & Poulain, 1993; IDF, 1990).

67. Régime hydrique : précipitations annuelles

Des précipitations moyennes annuelles entre 800 et 1200 mm et bien réparties lui conviennent (Boulet-Gercourt, 1998; Franc et al., 1992; Garsault, 1993; Wilhelm & Raffel, 1993).

Les couples températures-précipitations en Wallonie (Weissen et al., 1991a) :



68. Régime hydrique : épisodes secs

La sécheresse lui est moins préjudiciable qu'un excès d'humidité au printemps qui favorisent les maladies cryptogamiques (Garsault, 1993; IDF, 1990; Wilhelm & Raffel, 1993).

Il est même très tolérant à cette sécheresse, tant du sol que de l'air (Claessens et al., 2008).

69. Régime hydrique : engorgement temporaire

Sensible à une nappe temporaire, il lui faut un sol bien drainé sur les 50 premiers centimètres du sol. Dans le cas contraire, il y a un risque pathologique plus important, sensibilité au vent (système racinaire moins développé) et à la sécheresse (prospération moindre du sol) (Armand, 1995; Boulet-Gercourt, 1998; Claessens et al., 2008; Lévy & Lefevre, 2001; Raguin & Boulet-Gercourt, 1997).

70. Compaction des sols

Sensible au tassement du sol, il a besoin d'un sol bien structuré (Boulet-Gercourt, 1998; Catry & Poulain, 1993; Franc & Ruchaud, 1996; Raguin & Boulet-Gercourt, 1997).

71. Pauvreté chimique

Il tolère des pH entre 4 et 8, mais l'optimum se situe entre 5,5 et 7 (Armand, 1995; Boulet-Gercourt, 1998; Fernandez et al., 1994; Wilhelm & Raffel, 1993).

C'est une essence exigeante, demandant un niveau trophique élevé ou un bon équilibre chimique. Cette

exigence l'est autant pour sa présence que pour sa productivité (Claessens et al., 2008).

72. Vent

Au stade juvénile, il s'installe mieux sur stations abritées. Au stade adulte, sa résistance au vent dépend de son enracinement. Plusieurs sources de sensibilité accrue : sols superficiels, nappe temporaire, compaction (Armand, 1995; Boudru, 1986; Boulet-Gercourt, 1998; Wilhelm & Raffel, 1993).

73. Neige

Il est peu sensible au givre et neige collante (Weissen et al., 1991c).

74. Facteurs biotiques

Les principaux champignons et bactéries s'attaquant au merisier sont les suivants (Clauce et al., 1998; Delannoy et al., 1997; Masson, 2005; Weissen et al., 1991c) :

- a. *Blumeriella jaapii* (Cylindrosporiose ou anthracnose) : printemps humide et frais, feuilles.
- b. *Armillaria mellea* (Armillaire, pourridié) : racines des arbres fragilisés.

- c. *Pseudomonas mors-prunorum* (Chancres bactérien, bactériose du merisier) : rameaux et tronc sur stations non optimales.

Divers insectes (Clauce et al., 1998; Delannoy et al., 1997; Masson, 2005; Weissen et al., 1991c) : le puceron noir (*Mysus cerasi*), la cheimatobie hiémale (*Operophtera brumata*), l'anthronome du merisier, etc.

75. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

76. Ozone troposphérique

77. Retombées atmosphérique

78. Facteur âge

La longévité est voisine de 100 ans. Fréquemment, une pourriture au niveau du pied en vient à bout avant ce terme. Le terme d'exploitabilité se situe entre 50 et 70 ans (Hubert, 1980).

79. Bibliographie

- Armand, G. (1995). *Feuillus précieux : Conduite des plantations en ambiance forestière - Merisier, érable sycomore, frêne, chêne rouge d'Amérique*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 112.
- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- Boulet-Gercourt, B. (1998). *Le merisier*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 128, Paris.
- Catry, B. & Poulain, G. (1993). Le Merisier en Nord-Pas-de-Calais-Picardie. *Forêt entreprise*, 91 (4/1993).
- Claessens, H., Thibaut, A., & Rondeux, J. (2008). *Autécologie du merisier*. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux & Division de la Nature et des Forêts - Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement - Ministère de la Région Wallonne, Gembloux.
- Clauce, F., Fleisch, M.-R., & Van Landeghem, S. (1998). Le dépérissement du merisier en région Nord-Pas-de-Calais-Picardie - Picardie *Forêt entreprise*, 120/1998, 50-53.
- Delannoy, E., Luisetti, j., Vigouroux, A., & De Vilbonne, D. (1997). Problèmes sanitaires des plantations artificielles de Merisier - Recommandations. *Forêt entreprise*, 107, 19-21.
- Fernandez, R., Santi, F., & Dufour, J. (1994). Les matériels de reproduction sélectionnés du Merisier (*Prunus avium* L.) : classement, provenances et variabilités. *Revue Forestière Française*, 1994/6, 629-637.
- Franc, A., Bolchert, C., & Marzolf, G. (1992). Les exigences stationnelles du merisier : revue bibliographique. *Revue Forestière Française*, 44 (numéro spécial), 27-31.
- Franc, F. & Ruchaud, F. (1996). *Autécologie des feuillus précieux: frêne commun, merisier, érable sycomore, érable plane*. Cemagref Editions. pp 170, France.
- Garsault, J.-F. (1993). Des maladies foliaires du Merisier favorisées par les pluies. *La santé des Forêts* (1993), France. 30 p.
- Hubert, M. (1980). *Le merisier, arbre à bois*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 56, Paris.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Raguin, F. & Boulet-Gercourt, B. (1997). Groupe de travail - Merisier : de nouvelles ambitions. *Forêt entreprise*, 118, 12-13.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991a). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif.*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991b). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Wilhelm, G.-J. & Raffel, D. (1993). La sylviculture du mélange temporaire Hêtre - Merisier sur le plateau lorrain. *Revue Forestière Française*, 1993-6, 651-658.

80. Ouvrages consultés

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Barigah, S., Cochard, H., & Eshel, A. (2006). Towards selection of tree genotypes of higher drought resistance. *Symposium: Forest in a changing environment - Results of 20 years ICP Forest Monitoring* (Band 142), Göttingen. 118-119.

Becquey, J. (1992). IDF - Les plantations de feuillus précieux. D'abord éviter les erreurs. *Forêt entreprise*, 81 (1/1992), 33.

Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Broadmeadow, M.S.J., Ray, D., & Samuel, C.J.A. (2005). Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry*, 78 (2), 145-161.

- Chmielewski, F.-M., Müller, A., & Bruns, E. (2004). Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121 (1-2), 69-78.
- Chmielewski, F.M. & Rotzer, T. (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108 (2), 101-112.
- Claessens, H., Pauwels, D., Thibaut, A., & Rondeux, J. (1999). Site index curves and autecology of ash, sycamore and cherry in Wallonia (Southern Belgium). *Forestry*, 72 (3), 171-182.
- Curnel, Y. (2000). *Les potentiabilités écologiques et génotypiques du merisier (Prunus avium L.) en Région wallonne*. Mémoire de fin d'études, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Grabherr, G. (2009). Biodiversity in the high ranges of the Alps: Ethnobotanical and climate change perspectives. *Global Environmental Change*, In Press, Corrected Proof.
- Hedhly, A., Hormaza, J.I., & Herrero, M. (2003). The effect of temperature on stigmatic receptivity in sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Plant Cell and Environment*, 26 (10), 1673-1680.
- Hedhly, A., Hormaza, J.I., & Herrero, M. (2007). Warm temperatures at bloom reduce fruit set in sweet cherry. *Journal of Applied Botany and Food Quality-Angewandte Botanik*, 81 (2), 158-164.
- Hedhly, A., Hormaza, J.I., & Herrero, M. (2009). Global warming and sexual plant reproduction. *Trends in Plant Science*, 14 (1), 30-36.
- Heide, O.M. (2008). Interaction of photoperiod and temperature in the control of growth and dormancy of *Prunus* species. *Scientia Horticulturae*, 115 (3), 309-314.
- Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Reaftoyannis, Y., Savill, P.S., & Brus, R. Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *NOT YET PUBLISHED*.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Landmann, G. (2002). La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 54 (4), 375-388.
- Larrieu, L. & Gonin, P. (2009). Autécologie des fruitiers forestiers : merisier, alisier torminal, cormier, poirier commun et pommier sauvage. *Forêt entreprise*, 184, 14-21.
- Loreto, F. & Centritto, M. (2008). Leaf carbon assimilation in a water-limited world. *Plant Biosystems*, 142 (1), 154-161.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).

Misson, L., Rasse, D.P., Vincke, C., Aubinet, M., & François, L. (2002). Predicting transpiration from forest stands in Belgium for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111 (4), 265-282.

Nageleisen, L.-M. (1994). Le dépérissement actuel des feuillus divers: hêtre, merisier, alisier torminal, érable sycomore, peuplier, châtaignier, charme, aulne glutineux. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 554-562.

Nepveu, G. (1992). L'utilisation des bois de frêne et de merisier : aptitudes technologiques, facteurs de variabilité. *Revue Forestière Française*, 1992 Spécial, 142-149.

Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecoïnte, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rasse, N., Santi, F., Dufour, J., & Gauthier, A. (2005). Adaptation et performance de merisiers testés dans et hors de leur région d'origine - Conséquences pour l'utilisation de variétés. *Revue Forestière Française*, 57 (3), 277-288.

Robredo, A., Pérez-López, U., de la Maza, H.S., González-Moro, B., Lacuesta, M., Mena-Petite, A., & Muñoz-Rueda, A. (2007). Elevated CO₂ alleviates the impact of drought on barley improving water status by lowering stomatal conductance and delaying its effects on photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 59 (3), 252-263.

Thibaut, A. (2004). Autécologie du merisier et de l'érable sycomore en région wallonne. *Forêt Wallonne*, 73 (6), 40-47.

Thill, A. (1975). La sylviculture des feuillus dits secondaires. *Note Technique* (27), Gembloux, Faculté des Sciences Agronomiques, Centre d'Ecologie forestière et rurale, I.R.S.I.A. 12 p.

Thill, A. & Mathy, P. (1980). La culture des essences précieuses en Belgique. *Ann. Gembloux* (86)1-32.

Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.

Willoughby, I., Dixon, F.L., & Clay, D.V. (2006). Dormant season vegetation management in broadleaved transplants and direct sown ash (*Fraxinus excelsior* L.) seedlings. *Forest Ecology and Management*, 222 (1-3), 418-426.

Zerbe, S. & Wirth, P. (2006). Non-indigenous plant species and their ecological range in Central European pine (*Pinus sylvestris* L.) forests. *Annals of Forest Science*, 63, 189-203.

ROBINIER FAUX-ACACIA

Robinia pseudoacacia L.

Black locust

81. Température : moyenne annuelle & chaleur

Il lui faut une température annuelle moyenne supérieure à 8 °C. Pour information, en Hongrie où le Robinier se développe, la température annuelle moyenne est de 11,3 °C (pour des précipitation annuelles moyennes de 490 mm) (Fourbisseur et al., 2003; Weissen et al., 1991b).

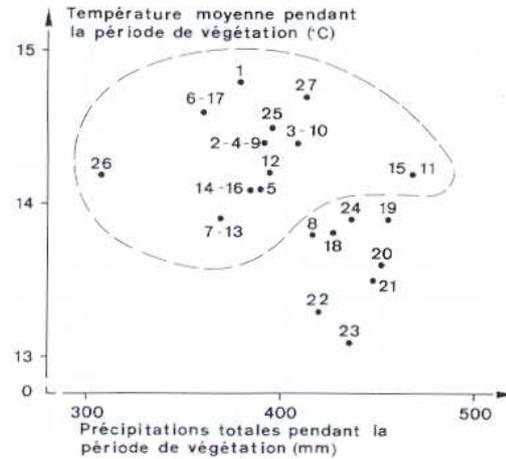
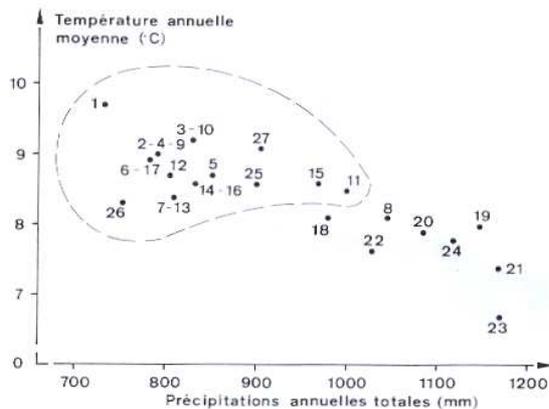
Point de vue chaleur, toujours en Hongrie, la moyenne estivale peut atteindre le chiffre de 28 °C (Fourbisseur et al., 2003).

82. Température : froid

Le minimum critique est renseigné à – 31 °C (Weissen et al., 1991b).

83. Régime hydrique : précipitations annuelles

Point de vue couples températures-précipitations en Région wallonne, il est exclu des territoires à trop basse températures moyennes annuelles (Weissen et al., 1991b).



84. Régime hydrique : épisodes secs

Essence xérocline à mésophile, il est résistant à la sécheresse (Weissen et al., 1991b).

85. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il supporte mal les nappes temporaire car très sensible à l'anaérobiose (Weissen et al., 1991b).

86. Compaction des sols

Il est sensible aux sols compactés (Weissen et al., 1991b).

87. Pauvreté chimique

Essence acidocline et neutrocline, il ne supporte pas des pH inférieur à 4,5, ni supérieur à 7 (Weissen et al., 1991b).

88. Vent

Il est considéré comme peu sensible aux stations venteuses (Weissen et al., 1991b).

89. Neige

L'espèce est sensible au neiges collantes, que ce soit le juvénile ou l'adulte (Weissen et al., 1991b).

90. Facteurs biotiques

Les champignons suivants (Weissen et al., 1991b) :

- a. Armillaire (*Armillaria mellea*) sur sols très secs.

- b. Gréville (*Cucurbitaria elongata*) et Chancres (*Phomopsis spp.*), altération du bois.
- c. *Chlorogenius robinia*, s'attaque aux feuilles et branches.

91. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

92. Ozone troposphérique

93. Retombées atmosphérique

94. Facteur âge

95. Bibliographie

Fourbisseur, A., Charron, S., Jourez, B., & Hébert, J. (2003). Le point sur la place du Robinier en Hongrie. *Forêt Wallonne*, 67 (Novembre-2003), 26-31.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

96. Ouvrages consultés

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Becker, T., Dietz, H., Billeter, R., Buschmann, H., & Edwards, P.J. (2005). Altitudinal distribution of alien plant species in the Swiss Alps. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 7 (3), 173-183.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourger, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Broadmeadow, M.S.J., Ray, D., & Samuel, C.J.A. (2005). Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry*, 78 (2), 145-161.

Calfapietra, C., Fares, S., & Loreto, F. (2009). Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone. *Environmental Pollution*, 157 (5), 1478-1486.

Chmielewski, F.-M. & Rötzer, T. (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108 (2), 101-112.

Daas, C., Montpied, P., Hanchi, B., & Dreyer, E. (2008). Responses of photosynthesis to high temperatures in oak saplings assessed by chlorophyll-a fluorescence: inter-specific diversity and temperature-induced plasticity. *Ann. For. Sci.*, 65, 305-312.

- Deschauwers, F. (2007). *Analyse du risque de la sylviculture de Robinia pseudoacacia L.* Mémoire de fin d'études, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Eamus, D., Jarvis, P.G., & Caswell, H. (2004). *The Direct Effects of Increase in the Global Atmospheric CO2 Concentration on Natural and Commercial Temperate Trees and Forests.* In *Advances in Ecological Research*. Vol. Volume 34, pp. 1-58. Academic Press.
- Eglin, T., Walter, C., Nys, C., Follain, S., Forgeard, F., Legout, A., & Squividant, H. (2008). Influence of waterlogging on carbon stock variability at hillslope scale in a beech forest (Fougères forest – West France). *Ann. For. Sci.*, 65, 202-212.
- Godefroid, S. (2001). Temporal analysis of the Brussels flora as indicator for changing environmental quality. *Landscape and Urban Planning*, 52 (4), 203-224.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur.* IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Iverson, L.R. & Prasad, A.M. (2002). Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US. *Forest Ecology and Management*, 155 (1-3), 205-222.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus.* E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Lebourgeois, F. (2007). Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Ann. For. Sci.*, 64, 333-343.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire.* ENGREF. pp 224, Nancy.
- Lu, P.L., Yu, Q., Liu, J.D., & Lee, X.H. (2006). Advance of tree-flowering dates in response to urban climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138 (1-4), 120-131.
- Lynch, J.P. & St.Clair, S.B. (2004). Mineral stress: the missing link in understanding how global climate change will affect plants in real world soils. *Field Crops Research*, 90 (1), 101-115.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003.* Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.

- Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruga, L., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2007). Phenological investigations of different winter-deciduous species growing under Mediterranean conditions. *Ann. For. Sci.*, 64, 557-568.
- Petit, R.J., Bialozyt, R., Garnier-Géré, P., & Hampe, A. (2004). Ecology and genetics of tree invasions: from recent introductions to Quaternary migrations. *Forest Ecology and Management*, 197 (1-3), 117-137.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J.P., & Menzel, A. (2006). Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Ann. For. Sci.*, 63, 569-577.
- Rouault, G., Candau, J.-N., Lieuter, F., Nageleisen, L.-M., Martin, J.-C., & Warzée, N. (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.*, 63, 613-624.
- Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.
- Walkovszky, A. (1998). Changes in phenology of the locust tree (*Robinia pseudoacacia* L) in Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 41 (4), 155-160.
- Walther, G.-R. (2003). Plants in a warmer world. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6 (3), 169-185.
- Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.
- Zhenghong, C., Mei, X., & Xuan, C. (2008). Change in flowering dates of Japanese Cherry Blossoms (*P. yedoensis* Mats.) on campus of Wuhan University and its relationship with variability of winter temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 28 (11), 5209-5217.

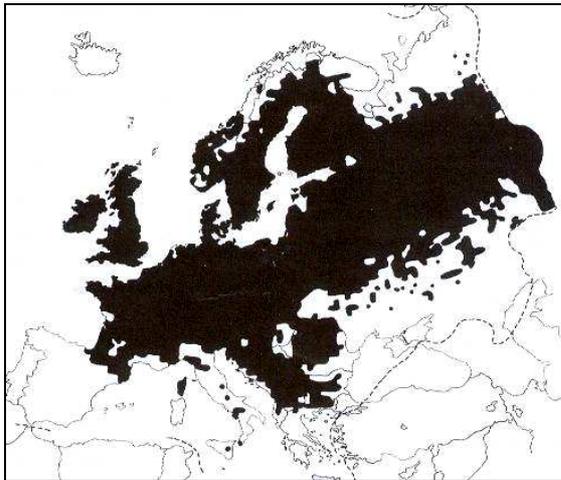
BOULEAU VERRUQUEUX

Betula pendula Roth

Silver birch

97. Température : moyenne annuelle & chaleur

A la vue de l'aire de répartition de l'espèce, il semble évident qu'elle évolue sur une large gamme d'amplitude de températures annuelles moyennes (Gielen, 2000; Weissen et al., 1991c).

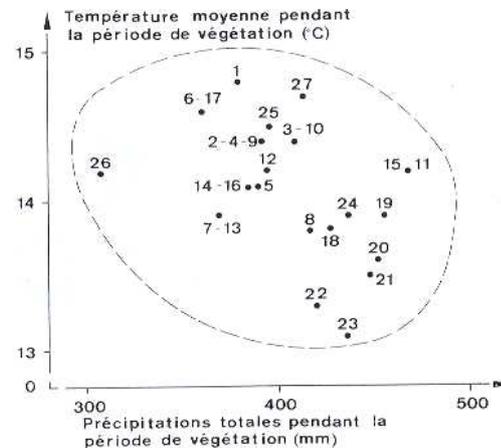
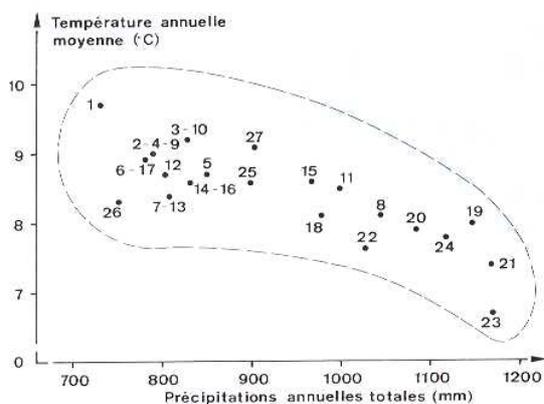


98. Température : froid

Il affectionne les climats froids et tempérés. Il est rustique et peu sensible aux gelées précoces et tardives (Gielen, 2000; Weissen et al., 1991c).

99. Régime hydrique : précipitations annuelles

Du point de vue couple températures-précipitations en Région wallonne, il a bien entendu sa place dans tous les territoires écologiques (Weissen et al., 1991c).



100. Régime hydrique : épisodes secs

A l'état juvénile et adulte, il est relativement sensible à la sécheresse (Weissen et al., 1991c). Malgré sa frugalité, cette relative sensibilité lui vient du potentiel hydrique induisant 50 % de perte de conductivité hydrique par embolie du système conducteur (Bréda, 2004). C'est une essence avec un optimum en milieu frais.

101. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il est sensible à l'anaérobiose (Weissen et al., 1991c).

102. Compaction des sols

Il est sensible à la compacité des sols (Weissen et al., 1991c).

103. Pauvreté chimique

Essence mésophile à large amplitude et à très large amplitude trophique, c'est une essence pionnière qui valorise des parcelles très frugales. Son installation permet entre autre de réduire les phénomènes d'érosion (Weissen et al., 1991c). Il ne supporte pas un pH supérieur à 8.

104. Vent

Il est peu sensible aux stations venteuses (Weissen et al., 1991c).

105. Neige

L'adulte est sensible aux neiges collantes (Weissen et al., 1991c).

106. Facteurs biotiques

Les champignons suivants (Weissen et al., 1991c) :

- a. *Discula betulina* sur les sujets maintenus serrés en pépinière.
- b. *Marssonina betulae* provoque une défoliation.
- c. *Melampsorium betulinum* provoque au final une défoliation.
- d. Le Polypore du bouleau (*Piptoporus betulinus*) agit sur des blessures ou sur des individus affaiblis ou vieillissants.

107. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

108. Ozone troposphérique

109. Retombées atmosphérique

110. Facteur âge

111. Bibliographie

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Gielen, C. (2000). *Etude des potentiabilités des bouleaux (Betula pendula Roth et Betula pubescens Ehrh.)*. Mémoire de fin d'études, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

112. Ouvrages consultés

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.

Baumgarten, M., Huber, C., Büker, P., Emberson, L., Dietrich, H.-P., Nunn, A.J., Heerdt, C., Beudert, B., & Matyssek, R. Are Bavarian Forests (southern Germany) at risk from ground-level ozone? Assessment using exposure and flux based ozone indices. *Environmental Pollution*, In Press, Corrected Proof.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.*, 63, 625-644.

- Broadmeadow, M.S.J., Ray, D., & Samuel, C.J.A. (2005). Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry*, 78 (2), 145-161.
- Calfapietra, C., Fares, S., & Loreto, F. (2009). Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone. *Environmental Pollution*, 157 (5), 1478-1486.
- Chuine, I., Cour, P., & Rousseau, D.D. (1999). Selecting models to predict the timing of flowering of temperate trees: implications for tree phenology modelling. *Plant Cell and Environment*, 22 (1), 1-13.
- Daas, C., Montpied, P., Hanchi, B., & Dreyer, E. (2008). Responses of photosynthesis to high temperatures in oak saplings assessed by chlorophyll-a fluorescence: inter-specific diversity and temperature-induced plasticity. *Ann. For. Sci.*, 65, 305-312.
- Devillez, F. (2005). Composition des groupements phytosociologiques et exigences écologiques des espèces qui les constituent. *Revue Forestière Française*, 57 (4), 311-325.
- Emberlin, J., Laaidi, M., Detandt, M., Gehrig, R., Jaeger, S., Myszkowska, D., Nolard, N., Rantio-Lehtimäki, A., & Stach, A. (2007). Changement climatique et évolution du contenu pollinique de l'air dans sept pays européens : exemple du bouleau. *Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique*, 47 (2), 57-63.
- Hanninen, H. (2006). Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits. *Tree Physiology*, 26 (7), 889-898.
- Hedhly, A., Hormaza, J.I., & Herrero, M. (2009). Global warming and sexual plant reproduction. *Trends in Plant Science*, 14 (1), 30-36.
- Heide, O.M. (2003). High autumn temperature delays spring bud burst in boreal trees, counterbalancing the effect of climatic warming. *Tree Physiology*, 23 (13), 931-936.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Jentsch, A. & Beierkuhnlein, C. (2008). Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems. *Comptes Rendus Geosciences*, 340 (9-10), 621-628.
- Kullman, L. (2008). Thermophilic tree species reinvade subalpine Sweden - Early responses to anomalous late holocene climate warming. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 40 (1), 104-110.
- Lefèvre, Y., Lebourgeois, F., & Bréda, N. (2006). Comportement des essences forestières sur sol à nappe temporaire. *Revue Forestière Française*, 58 (4), 295-304.

- Leinonen, I. (1996). Dependence of dormancy release on temperature in different origins of *Pinus sylvestris* and *Betula pendula* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 11 (2), 122-128.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.
- Linkosalo, T., Carter, T.R., Hakkinen, R., & Hari, P. (2000). Predicting spring phenology and frost damage risk of *Betula* spp. under climatic warming: a comparison of two models. *Tree Physiology*, 20 (17), 1175-1182.
- Linkosalo, T., Hakkinen, R., Terhivuo, J., Tuomenvirta, H., & Hari, P. (2009a). The time series of flowering and leaf bud burst of boreal trees (1846-2005) support the direct temperature observations of climatic warming. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (3-4), 453-461.
- Linkosalo, T., Häkkinen, R., Terhivuo, J., Tuomenvirta, H., & Hari, P. (2009b). The time series of flowering and leaf bud burst of boreal trees (1846-2005) support the direct temperature observations of climatic warming. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149 (3-4), 453-461.
- Linkosalo, T., Lappalainen, H.K., & Hari, P. (2008). A comparison of phenological models of leaf bud burst and flowering of boreal trees using independent observations. *Tree Physiology*, 28 (12), 1873-1882.
- Liu, L., King, J.S., & Giardina, C.P. (2005). Effects of elevated concentrations of atmospheric CO₂ and tropospheric O₃ on leaf litter production and chemistry in trembling aspen and paper birch communities. 25, 1511-1522.
- Manninen, S., Huttunen, S., Vanhatalo, M., Pakonen, T., & Hämäläinen, A. (2009). Inter- and intra-specific responses to elevated ozone and chamber climate in northern birches. *Environmental Pollution*, 157 (5), 1679-1688.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Matala, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Raitio, H., & Kellomäki, S. (2006). Modelling the response of tree growth to temperature and CO₂ elevation as related to the fertility and current temperature sum of a site. *Ecological Modelling*, 199 (1), 39-52.
- Matyssek, R., Bytnerowicz, A., Karlsson, P.E., Paoletti, E., Sanz, M., Schaub, M., & Wieser, G. (2007). Promoting the O₃ flux concept for European forest trees. *Environmental Pollution*, 146 (3), 587-607.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rousi, M. & Heinonen, J. (2007). Temperature sum accumulation effects on within-population variation and long-term trends in date of bud burst of European white birch (*Betula pendula*). *Tree Physiology*, 27 (7), 1019-1025.

Skre, O., Taulavuori, K., Taulavuori, E., Nilsen, J., Igeland, B., & Laine, K. (2008). The importance of hardening and winter temperature for growth in mountain birch populations. *Environmental and Experimental Botany*, 62 (3), 254-266.

Tegelberg, R., Julkunen-Tiitto, R., Vartiainen, M., Paunonen, R., Rousi, M., & Kellomäki, S. (2008). Exposures to elevated CO₂, elevated temperature and enhanced UV-B radiation modify activities of polyphenol oxidase and guaiacol peroxidase and concentrations of chlorophylls, polyamines and soluble proteins in the leaves of *Betula pendula* seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 62 (3), 308-315.

Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.

MÉLÈZE D'EUROPE

Larix decidua Miller

European larch

113. Température : moyenne annuelle & chaleur

De source française, l'intervalle de température moyenne annuelle est renseignée entre 3 et 9 °C, avec une moyenne à 5 °C (Masson, 2005). Cette essence montagnarde se comporte bien sur l'ensemble du territoire wallon, avec des températures moyennes plus élevées (Weissen et al., 1991a).

Il supporte des températures estivales élevées si le sol est bien pourvu en eau (Picard & Vernier, 1989).

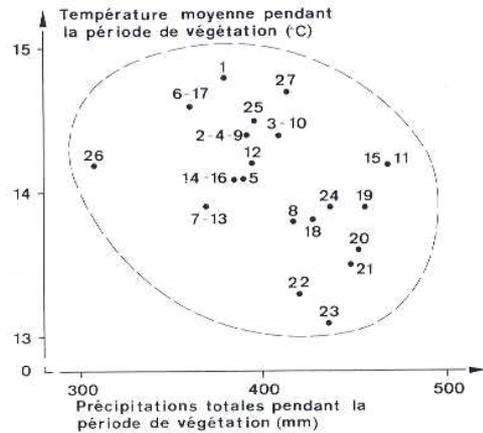
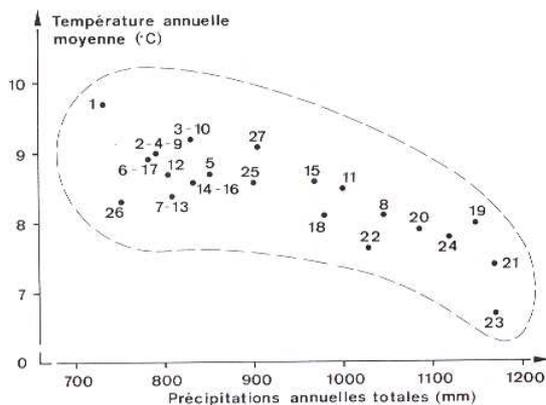
114. Température : froid

Il ne craint pas les grands froids et supporte des températures inférieures à - 30°C (Rameau et al., 1993).

115. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il demande entre 600 et 1100 mm de précipitations annuelles moyennes. Point de vue hygrométrie, elle affectionne une atmosphère sèche (Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

Les deux graphes reprenant le couple températures-précipitations des territoires écologiques wallons illustrent le fait qu'il puisse être à l'optimum sur l'ensemble de ces territoires (Weissen et al., 1991a) :



116. Régime hydrique : épisodes secs

Il craint la sécheresse estivale, d'autant plus si la station a des lacunes en alimentation d'eau (Mirault & Regad, 1992).

Cependant, la mesure des potentiels hydriques minimum lors de la sécheresse de 2003 reste supérieur à la limite induisant 50 % de perte hydrique par embolie du système conducteur (Bréda, 2004). Il a néanmoins subi des mortalités.

En Région wallonne, il est considéré comme peu sensible à la sécheresse (Weissen et al., 1991a).

117. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il tolère mal un engorgement car il est peu résistant à l'hypoxie (Lévy & Lefevre, 2001; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993). Une autre source le qualifie même de très sensible (Riou-Nivert, 2001).

118. Compaction des sols

Il est à éviter sur sols compacts ou très poreux (Rameau et al., 1993).

119. Pauvreté chimique

Si les besoins en eau sont satisfaits, le pH peut varier de 4 à 8. L'optimum se situe néanmoins entre 5,5 et 7 (Bartoli & Dumas, 1994; Rameau, 1992; Rameau et al., 1993; Riou-Nivert, 2001).

120. Vent

Réputé par sa bonne résistance physiologique et mécanique au vent, il peut néanmoins être sensible au chablis sur sols à nappes temporaires (Aussenac & Guehl, 1994; Doll & Riou-Nivert, 1991; Lévy & Lefevre, 2001; Picard & Vernier, 1989).

121. Neige

Il est peu sensible au givre et aux neiges collantes (Weissen et al., 1991a).

122. Facteurs biotiques

Comme champignon, l'Armillaire, ou encore appelé le pourridié (*Armillaria sp.*), « attaque » les arbres hors station. Point de vue insecte et d'une manière sporadique, l'Hylobe (*Hylobius abietis*) attaque l'écorce des jeunes plants et le Coléophore du Mélèze, appelé également Teigne du Mélèze (*Coleophora laricella*)

s'attaque aux aiguilles des peuplements purs de basses altitudes (Masson, 2005; Weissen et al., 1991a).

123. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

124. Ozone troposphérique

125. Retombées atmosphérique

Il est sensible au Dioxyde de Soufre (Masson, 2005).

126. Facteur âge

127. Bibliographie

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Bartoli, M. & Dumas, J.-M. (1994). Le Mélèze d'Europe dans les Pyrénées. *Revue Forestière Française*, 1994/3, 235-238.

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Doll, D. & Riou-Nivert, P. (1991). Dossier spécial tempêtes - Les Chablis en Europe : courons-nous au désastre ? *Forêt entreprise*, 77 (1991/5), 10.

Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Mirault, J. & Regad, J. (1992). Les dessèchements de rameaux du mélèze d'Europe. *La santé des forêts* (1992), France. 38.

Picard, J.-F. & Vernier, M. (1989). L'arboretum d'Amance (Meurthe-et-Moselle). *Revue Forestière Française*, 1989/3, 179-204.

Rameau, J.-C. (1992). Dynamique de la végétation à l'étage montagnard des Alpes du Sud. Première approche d'une typologie des hêtraies et hêtraies-sapinières. Les applications possible au niveau de la gestion. *Revue Forestière Française*, 5, 393-413.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecoite, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Riou-Nivert, P. (2001). *Le mélèze*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 144, Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

128. Ouvrages consultés

- Anfodillo, T., Rento, S., Carraro, V., Furlanetto, L., Urbinati, C., & Carrer, M. (1998). Tree water relations and climatic variations at the alpine timberline: seasonal changes of sap flux and xylem water potential in *Larix decidua* Miller, *Picea abies* (L.) Karst, and *Pinus cembra* L. *Annales Des Sciences Forestieres*, 55 (1-2), 159-172.
- Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.
- Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.
- Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.
- Bastien, J.-C. & Keller, R. (1980). Intérêts comparés du mélèze hybride (*Larix x eurolepis* Henry) avec les deux espèces parentes. *Revue Forestière Française*, 32 (6), 521-530.
- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- Bourgerie, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Buntgen, U., Frank, D., Wilson, R., Carrer, M., & Urbinati, C. (2008). Testing for tree-ring divergence in the European Alps. *Global Change Biology*, 14 (10), 2443-2453.
- Calfapietra, C., Fares, S., & Loreto, F. (2009). Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone. *Environmental Pollution*, 157 (5), 1478-1486.
- Claessens, H., Lecomte, H., & Pauwels, D. (2002). Le mélèze en région wallonne : état des lieux et stations potentielles. *Forêt Wallonne*, 61 (6), 4-9.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.
- Keller, T., Édouard, J.-L., Guibal, F., Guiot, J., Tessier, L., & Vila, B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres. Impact of a climatic warming scenario on tree growth. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, 323 (10), 913-924.
- Kienast, F., Wildi, O., & Brzeziecki, B. (1998). Potential impacts of climate change on species richness in mountain forests--An ecological risk assessment. *Biological Conservation*, 83 (3), 291-305.

- Kocher, P., Gebauer, T., Horna, V., & Leuschner, C. (2009). Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. *Ann. For. Sci.*, 66, 101-112.
- Kramer, K. (1995). Phenotypic Plasticity of the Phenology of 7 European Tree Species in Relation to Climatic Warming. *Plant Cell and Environment*, 18 (2), 93-104.
- Landmann, G. (2000). La santé des forêts françaises : bilan de l'année 1998 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 52 (1), 9-22.
- Landmann, G. (2002). La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 54 (4), 375-388.
- Leng, W., He, H.S., Bu, R., Dai, L., Hu, Y., & Wang, X. (2008). Predicting the distributions of suitable habitat for three larch species under climate warming in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 254, 420-428.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Migliavacca, M., Cremonese, E., Colombo, R., Busetto, L., Galvagno, M., Ganis, L., Meroni, M., Pari, E., Rossini, M., Siniscalco, C., & di Cella, U.M. (2008). European larch phenology in the Alps: can we grasp the role of ecological factors by combining field observations and inverse modelling? *International Journal of Biometeorology*, 52 (7), 587-605.
- Monserud, R.A. & Sterba, H. (1999). Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. *Forest Ecology and Management*, 113 (2-3), 109-123.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruga, L., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2007). Phenological investigations of different winter-deciduous species growing under Mediterranean conditions. *Ann. For. Sci.*, 64, 557-568.
- Osborne, C.P. & Beerling, D.J. (2002). Sensitivity of tree growth to a high CO₂ environment: consequences for interpreting the characteristics of fossil woods from ancient 'greenhouse' worlds. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 182 (1-2), 15-29.
- Pauwels, D., Lejeune, P., & Rondeux, J. (2007). A decision support system to simulate and compare silvicultural scenarios for pure even-aged larch stands. *Ann. For. Sci.*, 64, 345-353.
- Pilegaard, K., Hummelshøj, P., Jensen, N.O., & Chen, Z. (2001). Two years of continuous CO₂ eddy-flux measurements over a Danish beech forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107 (1), 29-41.

Rameau, J.-C. (1992). Dynamique de la végétation à l'étage montagnard des Alpes du Sud. Première approche d'une typologie des hêtraies et hêtraies-sapinières. Les applications possible au niveau de la gestion. *Revue Forestière Française*, 5, 393-413.

Rouault, G., Candau, J.-N., Lieuter, F., Nageleisen, L.-M., Martin, J.-C., & Warzée, N. (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.*, 63, 613-624.

Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.

Vila, B., Vennetier, M., Ripert, C., Chandiooux, O., Liang, E., Guibal, F., & Torre, F. (2008). Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France). *Ann. For. Sci.*, 65, 709-718.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

MÉLÈZE DU JAPON

Larix kaempferi (Lambert) Carr.

Japanese larch

129. Température : moyenne annuelle & chaleur

Il ne convient ni au climat montagnard trop froid ni au climat méditerranéen trop chaud. On estime son optimum autour de 9 °C de température moyenne annuelle (Boudru, 1986; Bourgery & Castaner, 1988; Jacamon, 1984a; Rameau et al., 1989).

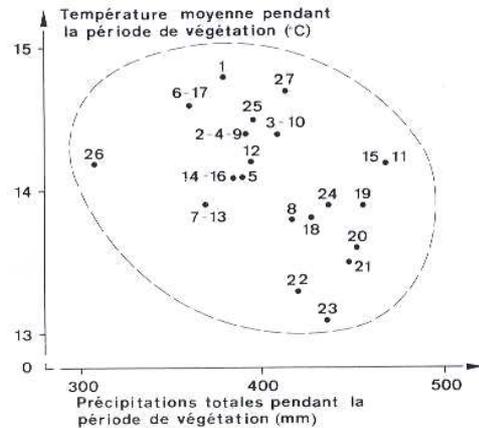
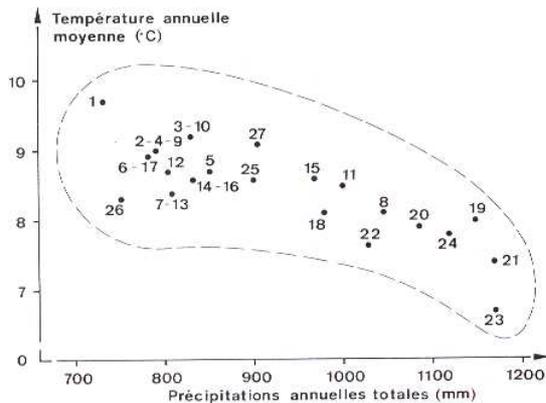
130. Température : froid

Il supporte des températures comprises entre - 18°C et - 28°C (Masson, 2005).

131. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il demande des précipitations annuelles moyennes élevées : entre 1000 et 2000 mm. Une compensation hygrométrique est possible (Boudru, 1986; Rameau et al., 1989; Riou-Nivert, 2001).

La potentialité au sein des territoires écologiques wallons est la même que pour le mélèze d'Europe (Weissen et al., 1991b) :



132. Régime hydrique : épisodes secs

Il exige des pluies bien réparties tout au long de l'année. Les sécheresses estivales lui sont préjudiciables. Une hygrométrie élevée peut cependant compenser (Boudru, 1986; Riou-Nivert, 2001).

133. Régime hydrique : engorgement temporaire

La mortalité est importante sur de nombreux sols à nappe temporaire. Il n'est pas capable de s'adapter à l'hypoxie (Boudru, 1986; Bourgery & Castaner, 1988; Lévy & Lefevre, 2001).

134. Compaction des sols

Tout comme le mélèze d'Europe, il est sensible à la compaction des sols et à l'anaérobiose (Boudru, 1986; Rameau et al., 1989; Riou-Nivert, 2001).

135. Pauvreté chimique

Pour un pH entre 4 et 5,5, il ne se trouve pas à l'optimal. Ce dernier comprend des pH entre 5,5 et 7. Au-delà, il est hors station (IDF, 1990; Rameau et al., 1989; Riou-Nivert, 2001).

Sur sols riches, il est à l'optimum. Il supporte également les sols pauvres (Boudru, 1986; Rameau et al., 1989; Riou-Nivert, 2001).

136. Vent

Il est préférable d'installer cette essence dans une station à l'abri du vent pour les raisons suivantes (Danduy des Déserts et al., 1990; Doll & Riou-Nivert, 1991) :

- a. Tige en sabre, phénomène dû à la courbaison de la flèche face au vent.
- b. Chablis sur sols meubles ou mouilleux.
- c. Dégât dans le houppier face à des vents violents.

137. Neige

Différence avec le mélèze d'Europe, l'adulte est sensible au givre et aux neiges collantes (Weissen et al., 1991b).

138. Facteurs biotiques

Comme champignon, l'Armillaire, ou encore appelé le pourridié (*Armillaria sp.*), « attaque » les arbres hors station. Point de vue insecte et d'une manière sporadique, l'Hylobe (*Hylobius abietis*) attaque l'écorce des jeunes plants et le Coléophore du Mélèze, appelé également Teigne du Mélèze (*Coleophora laricella*)

s'attaque aux aiguilles des peuplements purs de basses altitudes (Masson, 2005; Weissen et al., 1991b).

139. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

140. Ozone troposphérique

141. Retombées atmosphérique

Il est sensible au Dioxyde de Soufre, mais moins que le mélèze d'Europe (Masson, 2005).

142. Facteur âge

143. Bibliographie

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourgerly, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Danduy des Déserts, D., De la Broise, P., & Souleres, G. (1990). Les dégâts de l'ouragan des 15 et 16 octobre 1987 sur la forêt bretonne. *Revue Forestière Française*, 1990/6, 603-612.

Doll, D. & Riou-Nivert, P. (1991). Dossier spécial tempêtes - Les Chablis en Europe : courons-nous au désastre ? *Forêt entreprise*, 77 (1991/5), 10.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.

Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Riou-Nivert, P. (2001). *Le mélèze*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 144, Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

144. Ouvrages consultés

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

- Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.
- Bastien, J.-C. & Keller, R. (1980). Intérêts comparés du mélèze hybride (*Larix x eurolepis* Henry) avec les deux espèces parentes. *Revue Forestière Française*, 32 (6), 521-530.
- Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.*, 63, 625-644.
- Claessens, H., Lecomte, H., & Pauwels, D. (2002). Le mélèze en région wallonne : état des lieux et stations potentielles. *Forêt Wallonne*, 61 (6), 4-9.
- Daas, C., Montpied, P., Hanchi, B., & Dreyer, E. (2008). Responses of photosynthesis to high temperatures in oak saplings assessed by chlorophyll-a fluorescence: inter-specific diversity and temperature-induced plasticity. *Ann. For. Sci.*, 65, 305-312.
- Filipiak, M. & Napierala-Filipiak, A. (2008). Relation between the height of *Larix kaempferi* and some climatic characteristics in Poland. *Dendrobiology*, 60, 11-17.
- Landmann, G. (2000). La santé des forêts françaises : bilan de l'année 1998 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 52 (1), 9-22.
- Landmann, G. (2002). La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 54 (4), 375-388.
- Lebourgeois, F. (2007). Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Ann. For. Sci.*, 64, 333-343.
- Leng, W., He, H.S., Bu, R., Dai, L., Hu, Y., & Wang, X. (2008). Predicting the distributions of suitable habitat for three larch species under climate warming in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 254, 420-428.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruga, L., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2007). Phenological investigations of different winter-deciduous species growing under Mediterranean conditions. *Ann. For. Sci.*, 64, 557-568.

- Pauwels, D., Lejeune, P., & Rondeux, J. (2007). A decision support system to simulate and compare silvicultural scenarios for pure even-aged larch stands. *Ann. For. Sci.*, 64, 345-353.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J.P., & Menzel, A. (2006). Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Ann. For. Sci.*, 63, 569-577.
- Rouault, G., Candau, J.-N., Lieuter, F., Nageleisen, L.-M., Martin, J.-C., & Warzée, N. (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.*, 63, 613-624.
- Tyler, A.L., Macmillan, D.C., & Dutch, J. (1996). Models to predict the General Yield Class of Douglas fir, Japanese larch and Scots pine on better quality land in Scotland. *Forestry*, 69 (1), 13-24.
- Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.
- Vila, B., Vennetier, M., Ripert, C., Chandieux, O., Liang, E., Guibal, F., & Torre, F. (2008). Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France). *Ann. For. Sci.*, 65, 709-718.
- Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

MÉLÈZE HYBRIDE

Larix x eurolepis

Hybrid larch

C'est un hybride entre le mélèze d'Europe et le Mélèze du Japon.

145. Température : moyenne annuelle & chaleur

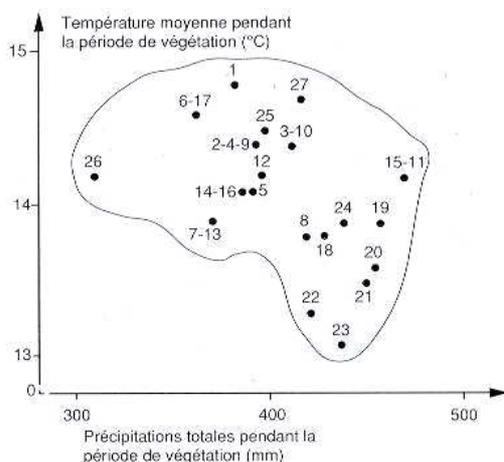
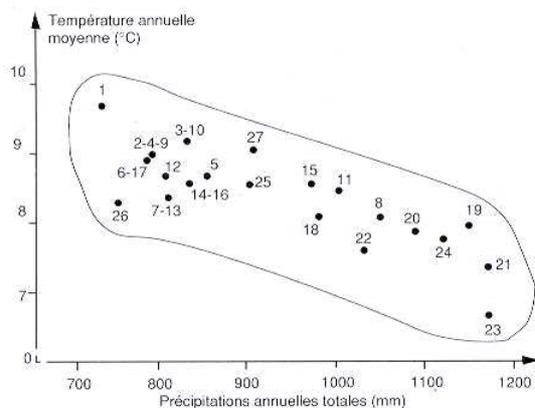
Information assez peu connue, mais il se développe bien sur l'ensemble des territoires écologiques de la Région wallonne (Weissen et al., 1991b).

146. Température : froid

Information assez peu connue, mais il se développe bien sur l'ensemble des territoires écologiques de la Région wallonne (Weissen et al., 1991b).

147. Régime hydrique : précipitations annuelles

Les deux graphes reprenant le couple températures-précipitations des territoires écologiques wallons illustrent le fait qu'il puisse être à l'optimum sur l'ensemble de ces territoires (Weissen et al., 1991b) :



148. Régime hydrique : épisodes secs

Point de vue sécheresse, l'hybride se situe entre l'europpéen (peu sensible) et le japonais (très sensible). Il est sensible (Weissen et al., 1991b).

Une autre source le considère comme très sensible (Riou-Nivert, 2001).

149. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il tolère mal un engorgement car il est peu résistant à l'hypoxie (Weissen et al., 1991b).

150. Compaction des sols

Il est sensible à la compacité des sols (Weissen et al., 1991b).

151. Pauvreté chimique

Essence mésophile à large amplitude trophique, il ne s'accommode pas de pH égal à 4 ou inférieur, ni égal à 7,5 ou supérieur (Weissen et al., 1991b). Exigences trophiques comparables à celles du mélèze du Japon (Riou-Nivert, 2001).

152. Vent

Il est peu sensible aux stations venteuses (Weissen et al., 1991b).

153. Neige

Il est peu sensible au givre et aux neiges collantes (Weissen et al., 1991b).

154. Facteurs biotiques

Les pathologies sont identiques que celles de *Larix decidua* et *Larix kaempferi*, mise à part une certaine résistance à la teigne du mélèze (*Colleophora laricella*). (Weissen et al., 1991b).

La résistance au Chancre (*Dasyscypha xillkommii*) est aussi bonne que *L. kaempferi* (Bastien & Keller, 1980).

155. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

156. Ozone troposphérique

158. Facteur âge

157. Retombées atmosphérique

159. Bibliographie

Bastien, J.-C. & Keller, R. (1980). Intérêts comparés du mélèze hybride (*Larix x eurolepis* Henry) avec les deux espèces parentes. *Revue Forestière Française*, 32 (6), 521-530.

Riou-Nivert, P. (2001). *Le mélèze*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 144, Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

160. Ouvrages consultés

Anfodillo, T., Rento, S., Carraro, V., Furlanetto, L., Urbinati, C., & Carrer, M. (1998). Tree water relations and climatic variations at the alpine timberline: seasonal changes of sap flux and xylem water potential in *Larix decidua* Miller, *Picea abies* (L.) Karst, and *Pinus cembra* L. *Annales Des Sciences Forestieres*, 55 (1-2), 159-172.

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.

Bartoli, M. & Dumas, J.-M. (1994). Le Mélèze d'Europe dans les Pyrénées. *Revue Forestière Française*, 1994/3, 235-238.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

- Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.
- Buntgen, U., Frank, D., Wilson, R., Carrer, M., & Urbinati, C. (2008). Testing for tree-ring divergence in the European Alps. *Global Change Biology*, 14 (10), 2443-2453.
- Calfapietra, C., Fares, S., & Loreto, F. (2009). Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone. *Environmental Pollution*, 157 (5), 1478-1486.
- Claessens, H., Lecomte, H., & Pauwels, D. (2002). Le mélèze en région wallonne : état des lieux et stations potentielles. *Forêt Wallonne*, 61 (6), 4-9.
- Doll, D. & Riou-Nivert, P. (1991). Dossier spécial tempêtes - Les Chablis en Europe : courons-nous au désastre ? *Forêt entreprise*, 77 (1991/5), 10.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.
- Keller, T., Édouard, J.-L., Guibal, F., Guiot, J., Tessier, L., & Vila, B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres. Impact of a climatic warming scenario on tree growth. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, 323 (10), 913-924.
- Kienast, F., Wildi, O., & Brzeziecki, B. (1998). Potential impacts of climate change on species richness in mountain forests--An ecological risk assessment. *Biological Conservation*, 83 (3), 291-305.
- Kocher, P., Gebauer, T., Horna, V., & Leuschner, C. (2009). Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. *Ann. For. Sci.*, 66, 101-112.
- Kramer, K. (1995). Phenotypic Plasticity of the Phenology of 7 European Tree Species in Relation to Climatic Warming. *Plant Cell and Environment*, 18 (2), 93-104.
- Landmann, G. (2000). La santé des forêts françaises : bilan de l'année 1998 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 52 (1), 9-22.
- Landmann, G. (2002). La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 54 (4), 375-388.
- Leng, W., He, H.S., Bu, R., Dai, L., Hu, Y., & Wang, X. (2008). Predicting the distributions of suitable habitat for three larch species under climate warming in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 254, 420-428.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Migliavacca, M., Cremonese, E., Colombo, R., Busetto, L., Galvagno, M., Ganis, L., Meroni, M., Pari, E., Rossini, M., Siniscalco, C., & di Cella, U.M. (2008). European larch phenology in the Alps: can we grasp the role of ecological factors by combining field observations and inverse modelling? *International Journal of Biometeorology*, 52 (7), 587-605.
- Mirault, J. & Regad, J. (1992). Les dessèchements de rameaux du mélèze d'Europe. *La santé des forêts* (1992), France. 38.
- Monserud, R.A. & Sterba, H. (1999). Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. *Forest Ecology and Management*, 113 (2-3), 109-123.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruga, L., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2007). Phenological investigations of different winter-deciduous species growing under Mediterranean conditions. *Ann. For. Sci.*, 64, 557-568.
- Osborne, C.P. & Beerling, D.J. (2002). Sensitivity of tree growth to a high CO₂ environment: consequences for interpreting the characteristics of fossil woods from ancient []greenhouse' worlds. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 182 (1-2), 15-29.
- Pauwels, D., Lejeune, P., & Rondeux, J. (2007). A decision support system to simulate and compare silvicultural scenarios for pure even-aged larch stands. *Ann. For. Sci.*, 64, 345-353.
- Picard, J.-F. & Vernier, M. (1989). L'arboretum d'Amance (Meurthe-et-Moselle). *Revue Forestière Française*, 1989/3, 179-204.
- Pilegaard, K., Hummelshøj, P., Jensen, N.O., & Chen, Z. (2001). Two years of continuous CO₂ eddy-flux measurements over a Danish beech forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107 (1), 29-41.
- Rameau, J.-C. (1992). Dynamique de la végétation à l'étage montagnard des Alpes du Sud. Première approche d'une typologie des hêtraies et hêtraies-sapinières. Les applications possible au niveau de la gestion. *Revue Forestière Française*, 5, 393-413.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rouault, G., Candau, J.-N., Lieuter, F., Nageleisen, L.-M., Martin, J.-C., & Warzée, N. (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.*, 63, 613-624.

Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.

Vila, B., Vennetier, M., Ripert, C., Chandioux, O., Liang, E., Guibal, F., & Torre, F. (2008). Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France). *Ann. For. Sci.*, 65, 709-718.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif.*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

PIN SYLVESTRE

Pinus sylvestris L.

Scots pine

161. Température : moyenne annuelle & chaleur

Point de vue température annuelle moyenne, il supporte de 3 à 13°C, l'optimum étant entre 6 et 10,5 °C. Sa résistance à la chaleur est admise et les chiffres des températures moyennes estivales entre 10 et 15,5 °C sont cités (Boudru, 1986; Jacamon, 1984; Masson, 2005).

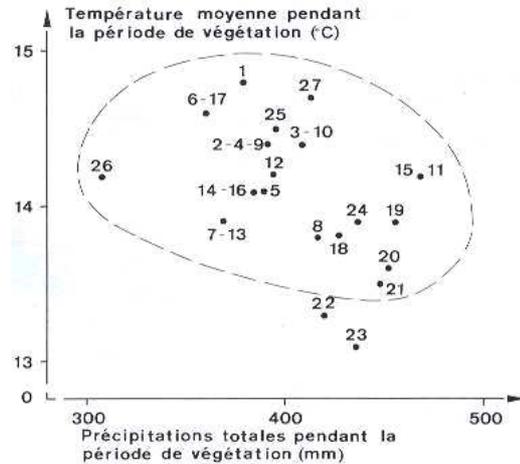
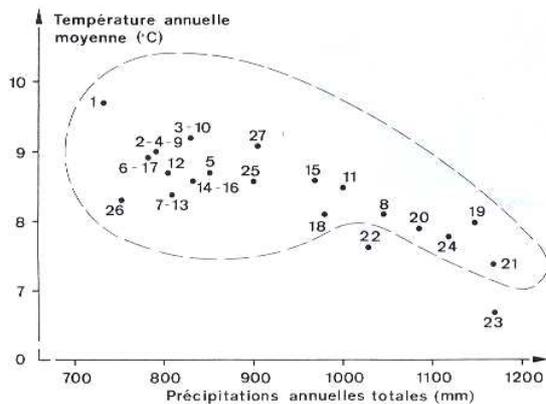
162. Température : froid

Très résistant aux grands froids, quelques dégâts sont signalés à partir de - 40°C (Masson, 2005).

163. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il admet une pluviosité annuelle entre 500 et 1300 mm (large amplitude) (Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

Il se comporte bien sur l'ensemble de la Région wallonne, comme le témoignent les deux graphes des couples températures-précipitations (Weissen et al., 1991) :



164. Régime hydrique : épisodes secs

La pluviosité estivale doit être comprise entre 300 et 750 mm (Masson, 2005). En Région wallonne, il est considéré comme peu sensible à la sécheresse (Weissen et al., 1991).

La mesure des potentiels hydriques minimum lors de la sécheresse de 2003 reste supérieur à la limite induisant 50 % de perte hydrique par embolie du système conducteur (Bréda, 2004).

L'excès de chaleur et de sécheresse limite son expansion aux abords de la Région méditerranéenne (Thibaut, 2006).

165. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il réagit relativement bien à l'engorgement temporaire car il supporte bien l'hypoxie et admet le dessèchement du sol sans difficultés. Dans le Sud de la France, on signale tout de même des dépérissements sur sols à faible Réserve Utile (Boudru, 1986; Lévy & Lefevre, 2001; Masson, 2005; Rameau et al., 1989).

166. Compaction des sols

Préférant les sols meubles, il craint les sols trop compactés à sa limite de distribution (Masson, 2005). En Wallonie, il est considéré comme peu sensible à la compacité (Weissen et al., 1991).

167. Pauvreté chimique

Essence pionnière et de croissance relativement lente par rapport à d'autres espèces, il supporte bien les sols pauvres et une large gamme de pH. On signale tout de

même des non-reprises sur sols podzolisés avec présence d'aliots (Masson, 2005).

168. Vent

Il possède une bonne résistance physiologique au vent. Sa résistance mécanique est renseignée plus médiocre (Aussenac & Guehl, 1994).

169. Neige

Il est très sensible aux neiges collantes (Weissen et al., 1991).

170. Facteurs biotiques

Les champignons suivants (Masson, 2005; Weissen et al., 1991) :

- Rouge pathologique des pins (*Lophodermium pinastri*) suite à un hiver doux et printemps-été humide.
- Rouille courbeuse (*Melampsora pinitorqua*) sur les jeunes pins en situation défavorables.
- Le Pourridié (*Armillaria sp.*)
- Etc

Les insectes suivants (Masson, 2005; Weissen et al., 1991) :

- Le Sténographe et le Scolyte acuminé (*Ips sp.*) suite à accidents climatiques.
- Le Pissode du pin (*Pissodes notatus*) sur jeunes plantations ou arbres affaiblis.
- Etc

171. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

172. Ozone troposphérique

173. Retombées atmosphérique

174. Facteur âge

175. Bibliographie

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.

Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Thibaut, K. (2006). *Etats des lieux et perspectives du Pin sylvestre (Pinus sylvestris L.) en Wallonie*. Mémoire de fin d'études, FUSAGx, Gembloux.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

176. Ouvrages consultés

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

- Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.
- Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Thibaut, K. (2006). *Etats des lieux et perspectives du Pin sylvestre (Pinus sylvestris L.) en Wallonie*. Mémoire de fin d'études, FUSAGx, Gembloux.
- Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

PIN LARICIO DE CORSE*Pinus nigra* Arnold subsp. *Laricio* Maire var. *corsicana* Loud.*Corsinacana* pine**177. Température : moyenne annuelle & chaleur**

Point de vue température annuelle moyenne, de 6 à 13°C et dans son aire naturelle de 9 à 10°C. Point de vue chaleur estivale, il supporte bien les fortes températures (Boudru, 1986; Masson, 2005).

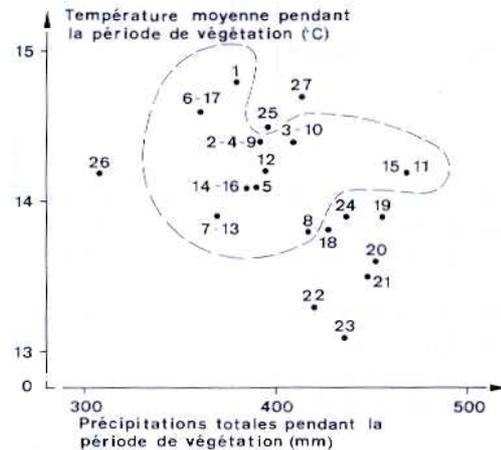
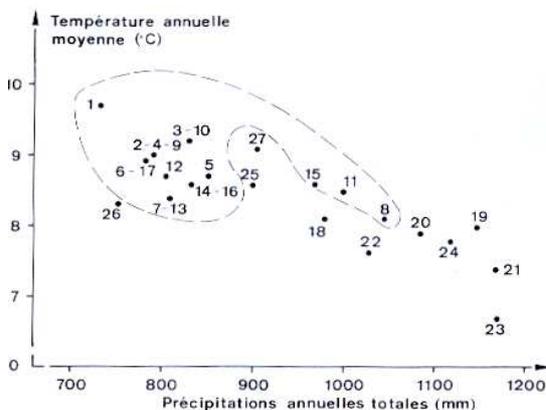
178. Température : froid

Il n'est pas très résistant au froid, surtout au stade juvénile (aiguilles détruites à partir de -25 °C) (Masson, 2005; Rameau et al., 1993).

179. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il demande au moins 800 mm de précipitations moyennes annuelles. Dans son aire d'origine, cela peut aller jusqu'à 1800 mm (Masson, 2005; Rameau et al., 1993).

En Région wallonne, le couple températures-précipitations l'exclue des territoires du Sud de l'Ardenne condruzienne.

**180. Régime hydrique : épisodes secs**

Il supporte une sécheresse estivale marquée pendant 2 à 3 mois (Jenner, 1991; Masson, 2005). Il est considéré comme plus résistant que le pin sylvestre (Bréda, 2004).

181. Régime hydrique : engorgement temporaire

Bien que sa production ne soit diminuée, il est apte sur sols à engorgement temporaire sauf sur pseudogley-podzoliques et pseudogley acides (Lévy & Lefevre, 2001; Masson, 2005).

182. Compaction des sols

Il préfère les sols poreux et accepte les sols très poreux (sables). Il devient sensible aux chablis sur sols compactés (Masson, 2005).

183. Pauvreté chimique

C'est une essence frugale, valorisante pour des stations difficiles. Il se comporte bien sur des sols à pH oscillant entre 4 et 7 (Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

184. Vent

En station, il résiste bien au vent et est même utilisé dans les dunes et comme brise-vent (Masson, 2005).

185. Neige

L'adulte est sensible aux neiges collantes (Weissen et al., 1991a).

186. Facteurs biotiques

Les champignons suivants (Masson, 2005; Weissen et al., 1991b) :

- Rouge pathologique des pins (*Lophodermium pinastri*) suite à un hiver doux et printemps-été humide.
- Rouille courbeuse (*Melampsora pinitorqua*) sur les jeunes pins en situation défavorables.
- Etc

Les insectes suivants (Masson, 2005; Weissen et al., 1991b) :

- Le Sténographe et le Scolyte acuminé (*Ips sp.*) suite à accidents climatiques.
- Le Pissode du pin (*Pissodes notatus*) sur jeunes plantations ou arbres affaiblis.
- Etc

187. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

188. Ozone troposphérique

189. Retombées atmosphérique

190. Facteur âge

191. Bibliographie

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Jenner, X. (1991). Le Pin laricio. Une essence d'avenir en Région centre. *Forêt de France*, 345 (juillet 1991), 20-24.

Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991a). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991b). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

192. Ouvrages consultés

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

- Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.
- Battipaglia, G., Saurer, M., Cherubini, P., Siegwolf, R.T.W., & Cotrufo, M.F. (2009). Tree rings indicate different drought resistance of a native (*Abies alba* Mill.) and a nonnative (*Picea abies* (L.) Karst.) species co-occurring at a dry site in Southern Italy. *Forest Ecology and Management*, 257 (3), 820-828.
- Bogino, S.M. & Bravo, F. (2008). Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Ann. For. Sci.*, 65, 506-519.
- Bourgerly, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.*, 63, 625-644.
- Campelo, F., Nabais, C., Freitas, H., & Gutiérrez, E. (2007). Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Ann. For. Sci.*, 64, 229-238.
- Certini, G., Ugolini, F.C., Corti, G., & Agnelli, A. (1998). Early stages of podzolization under Corsican pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *laricio*). *Geoderma*, 83 (1-2), 103-125.
- Froux, F., Huc, R., Ducrey, M., & Dreyer, E. (2002). Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). *Annals of Forest Science*, 59, 409-418.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.
- Kaushal, P., Guehl, J.M., & Aussenac, G. (1989). Differential Growth-Response to Atmospheric Carbon-Dioxide Enrichment in Seedlings of *Cedrus-Atlantica* and *Pinus-Nigra* Ssp *Laricio* Var *Corsicana*. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 19 (11), 1351-1358.
- Keller, T., Édouard, J.-L., Guibal, F., Guiot, J., Tessier, L., & Vila, B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres Impact of a climatic warming scenario on tree growth. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, 323 (10), 913-924.
- Landmann, G. (2000). La santé des forêts françaises : bilan de l'année 1998 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 52 (1), 9-22.

- Landmann, G. (2002). La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 54 (4), 375-388.
- Lebourgeois, F. (2007). Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Ann. For. Sci.*, 64, 333-343.
- Lebourgeois, F., Lévy, G., Aussenac, G., Clerc, B., & Willm, F. (1998). Influence of soil drying on leaf water potential, photosynthesis, stomatal conductance and growth in two black pine varieties. *Annals of Forest Science*, 55, 287-299.
- Lefèvre, Y., Lebourgeois, F., & Bréda, N. (2006). Comportement des essences forestières sur sol à nappe temporaire. *Revue Forestière Française*, 58 (4), 295-304.
- Martín-Benito, D., Gea-Izquierdo, G., del Río, M., & Cañellas, I. (2008). Long-term trends in dominant-height growth of black pine using dynamic models. *Forest Ecology and Management*, 256 (5), 1230-1238.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Nebout, J.P. (2008). A propos des plantations mélangées de Chêne sessile, Pin laricio de Corse et Pin sylvestre. *Revue Forestière Française*, 60 (2), 279-288.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruga, L., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2007). Phenological investigations of different winter-deciduous species growing under Mediterranean conditions. *Ann. For. Sci.*, 64, 557-568.
- Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.
- Vila, B., Vennetier, M., Ripert, C., Chandiooux, O., Liang, E., Guibal, F., & Torre, F. (2008). Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France). *Ann. For. Sci.*, 65, 709-718.

PIN NOIR D'AUTRICHE

Pinus nigra Arnold subsp. *nigra* var. *austriaca* (Höss) Novak
Austrian black pine

193. Température : moyenne annuelle & chaleur

Point de vue température moyenne annuelle, ce thermophile admet un intervalle entre 7 et 12 °C. Il supporte très bien les chaleurs estivales, entre 14,5 et 18 °C de température moyenne estivale (Ducrey, 1988; Masson, 2005).

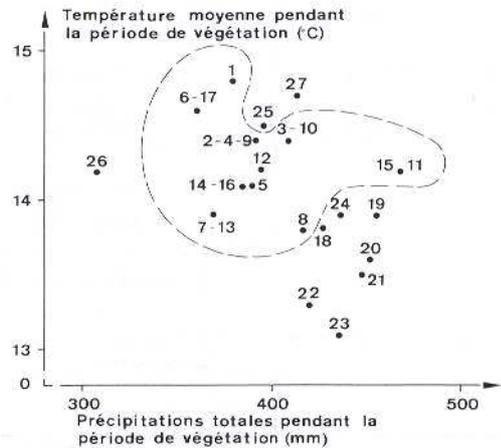
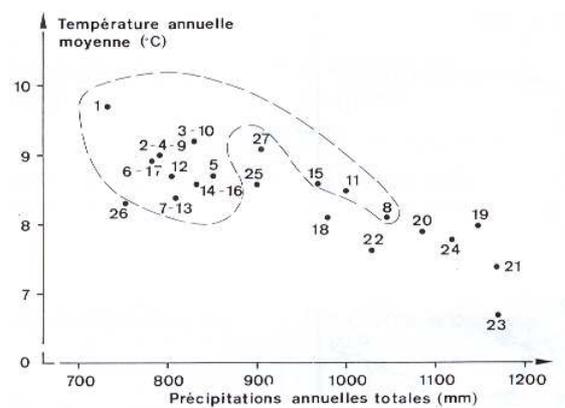
194. Température : froid

Il est très résistant aux grands froids, quelques dégâts sont signalés à partir de - 40 °C (Masson, 2005).

195. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il demande entre 600 et 1100 mm de précipitations moyennes annuelles (Masson, 2005).

Point de vue couple températures-précipitations en Région wallonne, il s'aligne sur le pin noir de Corse, ce qui se trouve en-dessous de l'Ardenne condruzienne ne lui convient pas (Weissen et al., 1991a).

**196. Régime hydrique : épisodes secs**

Résistant à la sécheresse, sa productivité est fortement conditionnée par la pluviosité. Les chiffres de 400 à 550 mm de pluies en période estivale sont cités (Ducrey, 1988; Masson, 2005). Il résiste bien à une atmosphère sèche. Il est considéré comme plus résistant que le pin sylvestre (Bréda, 2004).

197. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il résiste mal à la présence d'une nappe temporaire. Ces racines ne prospectent plus en profondeur, l'arbre est fragilisé face aux sécheresses et ravageurs (Bourgerly & Castaner, 1988; Lévy & Lefevre, 2001; Masson, 2005).

198. Compaction des sols

Il préfère les sols aérés, mais s'accommode bien de sols compactés (IDF, 1990; Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

199. Pauvreté chimique

Espèce frugale et colonisatrice, il peut s'installer sur des sols non calcaires et dont les éléments nutritifs sont difficilement mobilisables (expérience belge). Il est renseigné comme ne supportant pas l'acidité, il résiste néanmoins sur sols peu acides (Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

200. Vent

Il résiste bien au vent de par son enracinement puissant (Boudru, 1986; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993; Weissen et al., 1991a).

201. Neige

Il est peu sensible aux neiges collantes (Weissen et al., 1991a).

202. Facteurs biotiques

Les champignons suivants (Masson, 2005; Weissen et al., 1991b) :

- Rouille courbeuse (*Melampsora pinitorqua*) sur les jeunes pins en situation défavorables.
- Rouilles vésiculeuses de l'écorce des pins (*Cronartium sp.*) sur les jeunes sur versants chauds.
- Etc

Les insectes suivants (Masson, 2005; Weissen et al., 1991b) :

- Le Sténographe (*Ips sp.*) suite à accidents climatiques.
- Le Pissode du pin (*Pissodes notatus*) sur jeunes plantations ou arbres affaiblis.
- Etc

203. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

204. Ozone troposphérique

205. Retombées atmosphérique

206. Facteur âge

207. Bibliographie

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourgerly, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Ducrey, M. (1988). Réactions à la sécheresse de quelques espèces forestières méditerranéennes. *Revue Forestière Française*, 1988-5, 359-370.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecoite, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991a). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991b). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

208. Ouvrages consultés

- Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.
- Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.
- Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.
- Battipaglia, G., Saurer, M., Cherubini, P., Siegwolf, R.T.W., & Cotrufo, M.F. (2009). Tree rings indicate different drought resistance of a native (*Abies alba* Mill.) and a nonnative (*Picea abies* (L.) Karst.) species co-occurring at a dry site in Southern Italy. *Forest Ecology and Management*, 257 (3), 820-828.
- Bogino, S.M. & Bravo, F. (2008). Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Ann. For. Sci.*, 65, 506-519.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.*, 63, 625-644.
- Campelo, F., Nabais, C., Freitas, H., & Gutiérrez, E. (2007). Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Ann. For. Sci.*, 64, 229-238.
- Certini, G., Ugolini, F.C., Corti, G., & Agnelli, A. (1998). Early stages of podzolization under Corsican pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *laricio*). *Geoderma*, 83 (1-2), 103-125.
- Froux, F., Huc, R., Ducrey, M., & Dreyer, E. (2002). Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). *Annals of Forest Science*, 59, 409-418.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.
- Kaushal, P., Guehl, J.M., & Aussenac, G. (1989). Differential Growth-Response to Atmospheric Carbon-Dioxide Enrichment in Seedlings of *Cedrus-Atlantica* and *Pinus-Nigra* Ssp *Laricio* Var *Corsicana*. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 19 (11), 1351-1358.
- Keller, T., Édouard, J.-L., Guibal, F., Guiot, J., Tessier, L., & Vila, B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres / Impact of a climatic warming scenario on tree growth. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, 323 (10), 913-924.
- Landmann, G. (2000). La santé des forêts françaises : bilan de l'année 1998 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 52 (1), 9-22.

- Landmann, G. (2002). La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 54 (4), 375-388.
- Lebourgeois, F. (2007). Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Ann. For. Sci.*, 64, 333-343.
- Lebourgeois, F., Lévy, G., Aussenac, G., Clerc, B., & Willm, F. (1998). Influence of soil drying on leaf water potential, photosynthesis, stomatal conductance and growth in two black pine varieties. *Annals of Forest Science*, 55, 287-299.
- Lefèvre, Y., Lebourgeois, F., & Bréda, N. (2006). Comportement des essences forestières sur sol à nappe temporaire. *Revue Forestière Française*, 58 (4), 295-304.
- Martín-Benito, D., Gea-Izquierdo, G., del Río, M., & Cañellas, I. (2008). Long-term trends in dominant-height growth of black pine using dynamic models. *Forest Ecology and Management*, 256 (5), 1230-1238.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Nebout, J.P. (2008). A propos des plantations mélangées de Chêne sessile, Pin laricio de Corse et Pin sylvestre. *Revue Forestière Française*, 60 (2), 279-288.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruga, L., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2007). Phenological investigations of different winter-deciduous species growing under Mediterranean conditions. *Ann. For. Sci.*, 64, 557-568.
- Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.
- Vila, B., Vennetier, M., Ripert, C., Chandiooux, O., Liang, E., Guibal, F., & Torre, F. (2008). Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France). *Ann. For. Sci.*, 65, 709-718.

PIN DE KOEKELARE

Pinus nigra Arnold subsp. *laricio* cv. *Koekelare*
Koekelare pine

C'est un pin hybride entre « *Pinus nigra* subsp. *Laricio* var. *corsicana* » et « *Pinus nigra* subsp. *Laricio* var. *calabrica* ». Il est issu de Koekelare, en Flandres.

209. Température : moyenne annuelle & chaleur

Point de vue température annuelle moyenne, de 6 à 13°C et dans son aire naturelle de 9 à 10°C. Point de vue chaleur estivale, il supporte bien les fortes températures (Boudru, 1986; Masson, 2005).

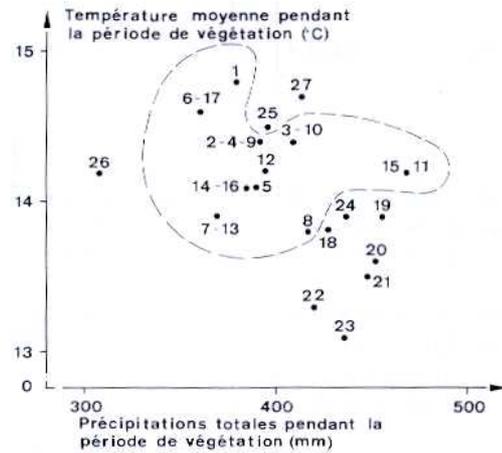
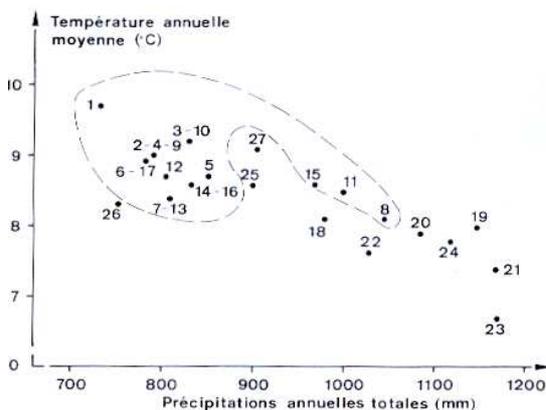
210. Température : froid

Il n'est pas très résistant au froid, surtout au stade juvénile (aiguilles détruites à partir de -25 °C) (Masson, 2005; Rameau et al., 1993). Il est un peu moins sensible au-delà de 20-30 ans (Weissen et al., 1991).

211. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il demande au moins 800 mm de précipitations moyennes annuelles. Dans son aire d'origine, cela peut aller jusqu'à 1800 mm (Masson, 2005; Rameau et al., 1993).

En Région wallonne, le couple températures-précipitations l'exclue des territoires du Sud de l'Ardenne condruzienne.



212. Régime hydrique : épisodes secs

Il supporte une sécheresse estivale marquée pendant 2 à 3 mois (Jenner, 1991; Masson, 2005).

Différence avec le pin noir de Corse, il ne supporte pas un drainage excessif (Weissen et al., 1991).

213. Régime hydrique : engorgement temporaire

Bien que sa production ne soit diminuée, il est apte sur sols à engorgement temporaire sauf sur pseudogley-podzoliques et pseudogley acides (Lévy & Lefevre, 2001; Masson, 2005).

214. Compaction des sols

Il préfère les sols poreux et accepte les sols très poreux (sables). Il devient sensible aux chablis sur sols compactés (Masson, 2005).

215. Pauvreté chimique

C'est une essence frugale, valorisante pour des stations difficiles. Il se comporte bien sur des sols à pH oscillant entre 4 et 7 (Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

216. Vent

En station, il résiste bien au vent et est même utilisé dans les dunes et comme brise-vent (Masson, 2005).

217. Neige

L'adulte et le juvénile sont peu sensibles aux neiges collantes (différence avec le pin noir de Corse) (Weissen et al., 1991).

218. Facteurs biotiques

Les champignons suivants (Masson, 2005; Weissen et al., 1991) :

- Rouge pathologique des pins (*Lophodermium pinastri*) suite à un hiver doux et printemps-été humide.
- Rouille courbeuse (*Melampsora pinitorqua*) sur les jeunes pins en situation défavorables.
- Etc

Les insectes suivants (Masson, 2005; Weissen et al., 1991) :

- Le Sténographe et le Scolyte acuminé (*Ips sp.*) suite à accidents climatiques.
- Le Pissode du pin (*Pissodes notatus*) sur jeunes plantations ou arbres affaiblis.

- Etc

219. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

220. Ozone troposphérique

221. Retombées atmosphérique

222. Facteur âge

223. Bibliographie

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Jenner, X. (1991). Le Pin laricio. Une essence d'avenir en Région centre. *Forêt de France*, 345 (juillet 1991), 20-24.

Lévy, G. & Lefevre, Y. (2001). *La forêt et sa culture sur sol à nappe temporaire*. ENGREF. pp 224, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

224. Ouvrages consultés

Arbez, M. & Lacaze, J.-F. (1999). *Les ressources génétiques forestières en France*. Quae. pp 410.

Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.

Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.

Battipaglia, G., Saurer, M., Cherubini, P., Siegwolf, R.T.W., & Cotrufo, M.F. (2009). Tree rings indicate different drought resistance of a native (*Abies alba* Mill.) and a nonnative (*Picea abies* (L.) Karst.) species co-occurring at a dry site in Southern Italy. *Forest Ecology and Management*, 257 (3), 820-828.

- Bogino, S.M. & Bravo, F. (2008). Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Ann. For. Sci.*, 65, 506-519.
- Bourgerly, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologicals et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.*, 63, 625-644.
- Campelo, F., Nabais, C., Freitas, H., & Gutiérrez, E. (2007). Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Ann. For. Sci.*, 64, 229-238.
- Certini, G., Ugolini, F.C., Corti, G., & Agnelli, A. (1998). Early stages of podzolization under Corsican pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *laricio*). *Geoderma*, 83 (1-2), 103-125.
- Froux, F., Huc, R., Ducrey, M., & Dreyer, E. (2002). Xylem hydraulic efficiency versus vulnerability in seedlings of four contrasting Mediterranean tree species (*Cedrus atlantica*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus halepensis* and *Pinus nigra*). *Annals of Forest Science*, 59, 409-418.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.
- Kaushal, P., Guehl, J.M., & Aussenac, G. (1989). Differential Growth-Response to Atmospheric Carbon-Dioxide Enrichment in Seedlings of *Cedrus-Atlantica* and *Pinus-Nigra* Ssp *Laricio* Var *Corsicana*. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 19 (11), 1351-1358.
- Keller, T., Édouard, J.-L., Guibal, F., Guiot, J., Tessier, L., & Vila, B. (2000). Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres Impact of a climatic warming scenario on tree growth. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, 323 (10), 913-924.
- Landmann, G. (2000). La santé des forêts françaises : bilan de l'année 1998 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 52 (1), 9-22.
- Landmann, G. (2002). La santé des forêts françaises : bilan des années 2000 et 2001 et nouveaux acquis. *Revue Forestière Française*, 54 (4), 375-388.
- Lebourgeois, F. (2007). Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Ann. For. Sci.*, 64, 333-343.

- Lebourgeois, F., Lévy, G., Aussenac, G., Clerc, B., & Willm, F. (1998). Influence of soil drying on leaf water potential, photosynthesis, stomatal conductance and growth in two black pine varieties. *Annals of Forest Science*, 55, 287-299.
- Lefèvre, Y., Lebourgeois, F., & Bréda, N. (2006). Comportement des essences forestières sur sol à nappe temporaire. *Revue Forestière Française*, 58 (4), 295-304.
- Martín-Benito, D., Gea-Izquierdo, G., del Río, M., & Cañellas, I. (2008). Long-term trends in dominant-height growth of black pine using dynamic models. *Forest Ecology and Management*, 256 (5), 1230-1238.
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2004). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2003*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 24, Birmensdorf (Allemagne).
- Nebout, J.P. (2008). A propos des plantations mélangées de Chêne sessile, Pin laricio de Corse et Pin sylvestre. *Revue Forestière Française*, 60 (2), 279-288.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Orlandi, F., Bonofiglio, T., Ruga, L., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2007). Phenological investigations of different winter-deciduous species growing under Mediterranean conditions. *Ann. For. Sci.*, 64, 557-568.
- Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt Wallonne*, 79 (6), 34-46.
- Vila, B., Vennetier, M., Ripert, C., Chandioix, O., Liang, E., Guibal, F., & Torre, F. (2008). Has global change induced divergent trends in radial growth of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* at their bioclimatic limit? The example of the Sainte-Baume forest (south-east France). *Ann. For. Sci.*, 65, 709-718.
- Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif.*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

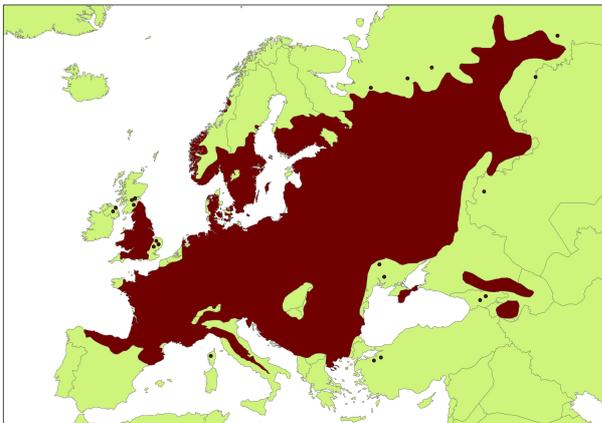
TILLEUL À PETITES FEUILLES

Tilia cordata Mill.

Small-leaved Lime, little-leaf linden, common linden

225. Distribution géographique

La carte ci-dessous reprend l'aire de répartition du tilleul à petites feuilles (source : www.biodiversity.org/networks/euforgen). Les différentes aires de répartition fournies par EUFORGEN ont été réalisées sur base d'une compilation d'informations (bibliographie existante, communications scientifiques) par des membres de ce réseau. La carte représente donc la situation observable actuellement et donc non une carte de potentialité sylvicole à l'échelle européenne.



226. Température : moyenne annuelle & chaleur

En ce qui concerne les données relevées en Wallonie (Weissen et al., 1991), la température moyenne annuelle doit être supérieure à 8°C. Sa large distribution européenne suppose une tolérance pour une température moyenne élevée. Il est toutefois assez rare en région méditerranéenne (en situation ripicole si présent) (Rameau et al., 1989).

La distribution européenne de *T. cordata* est corrélée avec la température du Nord de l'Europe (isotherme de la moyenne annuelle de + 2°C) et avec l'isotherme de la moyenne du mois de juillet (+ 17°C) (Kalliopi et al., 2008; Pigott & Huntley, 1979). Néanmoins, les sécheresses estivales doivent influencer cette répartition (cfr situation ripicole en région méditerranéenne).

227. Température : froid

Sa tendance continentale sous-entend qu'il ne craint pas le froid (IDF, 1981; Jacamon, 1984).

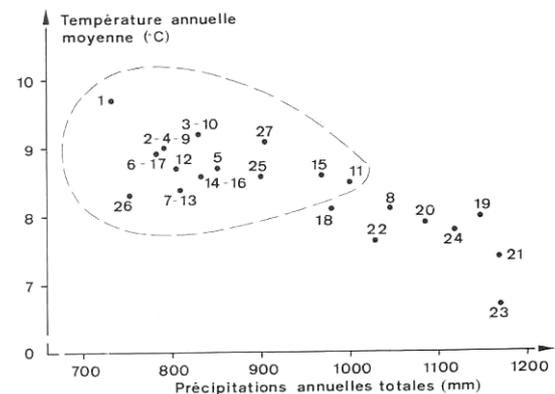
Il est peu sensible aux gelées précoces et aux gelées tardives (Weissen et al., 1991).

228. Régime hydrique : précipitations annuelles

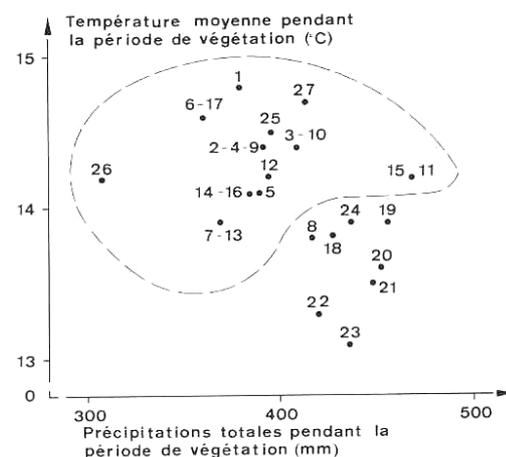
La limite sud de répartition de l'espèce correspond à 500-550 mm de précipitations annuelles moyennes. Il est donc résistant à la sécheresse (voir section 5) (Hemery et al., 2008).

En région wallonne, les précipitations annuelles moyennes relevées pour les territoires écologiques convenant à l'espèce sont comprises entre 700 et 1000 mm (Weissen et al., 1991).

Le graphe suivant avec données extraites en Région wallonne illustre le paragraphe précédent (Weissen et al., 1991) :



Dans le même ordre d'idée, mais ne s'intéressant qu'à la période de végétation (Weissen et al., 1991) :



229. Régime hydrique : épisodes secs

Il est considéré comme peu sensible à la sécheresse (Kalliopi et al., 2008; Weissen et al., 1991). C'est une espèce à tendance mésophile réclamant des sols profonds. Sa tendance devient mésohygrophile si l'on le considère en région méditerranéenne (Rameau et al., 1989). Il est considéré comme mésophile à xérocline en région wallonne (Weissen et al., 1991).

230. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il accepte une réduction à faible profondeur et est peu sensible à l'anaérobiose, à condition qu'elle soit temporaire (Kalliopi et al., 2008; Weissen et al., 1991). Il est plus plastique que *T. platyphyllos* de ce point de vue.

231. Compaction des sols

Il est insensible à la compacité et possède un enracinement pivotant, avec racines latérales profondes (Weissen et al., 1991). Malgré cette insensibilité, il ne faut céder à la tentation de considérer le système racinaire du tilleul comparable à celui du chêne, ce dernier restant plus efficient dans la prospection du sol, notamment à grande profondeur (Kübner, 2003).

232. Pauvreté chimique

En ce qui concerne le pH, l'optimum se situe au-dessus de 5. Il tolère un pH entre 4 et 5, mais est hors station sur des sols plus acide (Weissen et al., 1991).

Son humus optimum est un mull mésotrophe (fourchette allant du mull eutrophe au moder). Il affectionne des sols riches en bases (Kalliopi et al., 2008; Rameau et al., 1989).

233. Vent

Que ce soit le juvénile ou l'adulte, il est considéré comme peu sensible aux stations venteuses (Weissen et al., 1991).

234. Neige

Point de vue neige collante et givre, il y est peu sensible également à tous les stades (Weissen et al., 1991).

235. Facteurs biotiques

Les agents pathogènes principaux recensés en région wallonne sont les suivants (Weissen et al., 1991) :

- a. *Armillaria bulbosa* (Armillaire) sur des arbres déjà affaiblis, provoquant défoliation et éventuellement mort de l'arbre.
- b. *Cercospora microsora* lors d'été humide, provoquant des tâches noires sur les feuilles.
- c. *Discella desmazierii*, provoquant un dessèchement des rameaux.
- d. *Eucallipterus tiliarium*, puceron provoquant un brunissement et une chute précoce des feuilles sur stations à bilan hydrique défavorables.
- e. etc

236. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

237. Ozone troposphérique

238. Retombées atmosphérique

239. Facteur âge

Les tilleuls ont une longévité atteignant les 200 ans, parfois même 300 ans (Kalliopi et al., 2008; Pigott, 1991).

240. Bibliographie

Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Raftoyannis, P.S., & Brus, R. (2008). Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *COST Special issue draft*.

IDF (1981). *Cultiver les arbres feuillus pour récolter un bois de qualité*. Institut pour le Développement Forestier. pp 277, France.

Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.

Kalliopi, R., Dorota, D., Gavriil, S., & Valeriu-Norocel, N. (2008). A review on the ecology and silviculture of limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. *COST Special issu draft*.

Kübner, R. (2003). Mortality patterns of *Quercus*, *Tilia*, and *Fraxinus* germinants in a floodplain forest on the river Elbe, Germany. *Forest Ecology and Management*, 173, 37-48.

Pigott, C.D. (1991). *Tilia cordata* Miller (*T. europaea* L. pro parte, *T. parvifolia* Ehrh. ex Hoffm., *T. sylvestris* Desf., *T. foemina folio minore* Bauhin). *Journal of Ecology*, 79 (4), 1147-1207.

Pigott, C.D. & Huntley, J.P. (1979). Factors controlling the distribution of *Tilia cordata* at the northern limits of its geographical range. *New phytologist*, 84 (1), 145-164.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

241. Ouvrages consultés

Aasamaa, K., Sober, A., Hartung, W., & Niinemets, U. (2004). Drought acclimation of two deciduous tree species of different layers in a temperate forest canopy. *Trees*, 18, 93-101.

Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.

Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.

- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- Bourgerly, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Ellenberg, H. (1996). *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. (5th ed.) Ulmer. pp 1096, Stuttgart.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Kull, O. & Tulva, I. (2002). Shoot structure and growth along a vertical profile within a Populus-Tilia canopy. *Tree Physiology*, 22, 1167-1175.
- Lanier, L., Badré, M., Delabraze, P., Dubourdieu, J., & Flammarion, J.P. (1986). *Précis de sylviculture*. Génie Rural, des Eaux et des Forêts. pp 468, Nancy (France).
- Meier, F., Engesser, R., Forster, B., & Odermatt, O. (2005). *Protection des forêts - Vue d'ensemble 2004*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). pp 20, Birmensdorf (Allemagne).
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Pigott, C.D. & Pigott, S. (1993). Water as a determinant of the distribution of trees at the boundary of the Mediterranean zone. *Journal of Ecology*, 81, 557-566.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Sellin, A. & Kupper, P. (2007). Temperature, light and leaf hydraulic conductance of little-leaf linden (*Tilia cordata*) in a mixed forest canopy. *Tree Physiology*, 27, 679-688.
- Spano, D., Cesaraccio, C., Duce, P., & Snyder, R.L. (1999). Phenological stages of natural species and their use as climate indicators. *Int. J. Biometeorol.*, 42, 124-133.

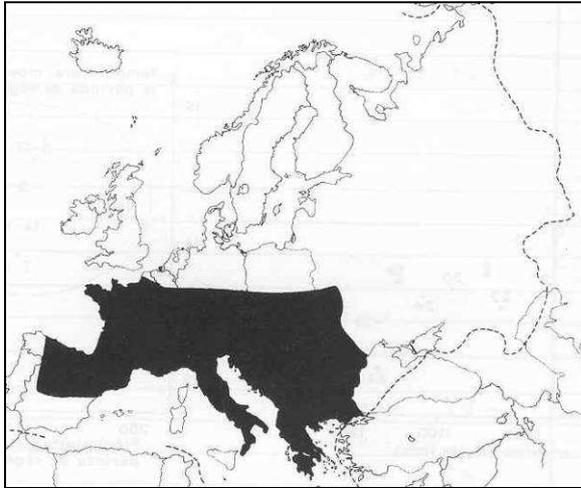
TILLEUL À GRANDES FEUILLES

Tilia platyphyllos Scop.

Broad-leaved Lime

242. Distribution géographique

De répartition moins étendue que le tilleul à petites feuilles, il est absent du Nord et de l'Est de l'Europe (Weissen et al., 1991). D'une manière légère, il épouse également mieux le circum-méditerranéen en englobant l'Italie plus en avant et également la Grèce.



243. Température : moyenne annuelle & chaleur

En ce qui concerne les données relevées en Wallonie (Weissen et al., 1991), la température moyenne annuelle doit être supérieure à 8°C. Sa large distribution européenne suppose une tolérance pour une température moyenne élevée. Dans la flore forestière française, il est considéré comme essence eurasiatique, subatlantique, subméditerranéenne (Rameau et al., 1989).

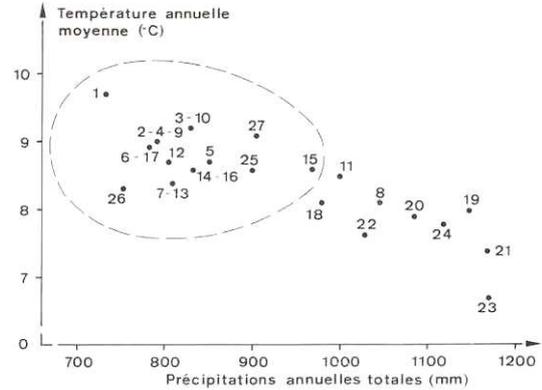
244. Température : froid

Il est peu sensible aux gelées précoces et aux gelées tardives (Weissen et al., 1991).

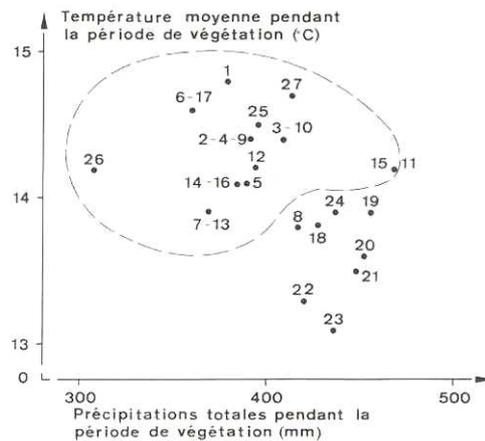
245. Régime hydrique : précipitations annuelles

En région wallonne, les précipitations annuelles moyennes relevées pour les territoires écologiques convenant à l'espèce sont comprises entre 700 et 1000 mm (Weissen et al., 1991).

Le graphe suivant avec données extraites en Région wallonne illustre le paragraphe précédent (Weissen et al., 1991) :



Dans le même ordre d'idée, mais ne s'intéressant qu'à la période de végétation (Weissen et al., 1991) :



246. Régime hydrique : épisodes secs

Il est considéré comme peu sensible à la sécheresse, même plus résistant que *T. cordata* (Kalliopi et al., 2008; Weissen et al., 1991). C'est une espèce à tendance xérophile à mésophile (Rameau et al., 1989). Comme *T. cordata*, il est considéré comme mésophile à xérocline en région wallonne (Weissen et al., 1991).

247. Régime hydrique : engorgement temporaire

Avec sa tendance mésophile marquée, les sols considérés comme frais ne lui conviennent déjà plus (Rameau et al., 1989). Il se révèle plus sensible à l'anaérobiose que *T. cordata* (Weissen et al., 1991).

248. Compaction des sols

Il est insensible à la compacité et possède un enracinement pivotant, avec racines latérales profondes

(Weissen et al., 1991). Malgré cette insensibilité, il ne faut céder à la tentation de considérer le système racinaire du tilleul comparable à celui du chêne, ce dernier restant plus efficace dans la prospection du sol, notamment à grande profondeur (Kübner, 2003).

249. Pauvreté chimique

Plus exigeant que *T. cordata* en ce qui concerne le pH, l'optimum se situe au-dessus de 6. Il tolère un pH entre 5 et 6, mais est hors station sur des sols plus acide (Weissen et al., 1991).

Il affectionne les matériaux carbonatés. On lui attribue un caractère indicateur neutrocalcicole (Rameau et al., 1989).

250. Vent

Que ce soit le juvénile ou l'adulte, il est considéré comme peu sensible aux stations venteuses (Weissen et al., 1991).

251. Neige

Point de vue neige collante et givre, il y est peu sensible également à tous les stades (Weissen et al., 1991).

252. Facteurs biotiques

Les agents pathogènes principaux recensés en région wallonne sont les suivants (Weissen et al., 1991) :

- a. *Armillaria bulbosa* (Armillaire) sur des arbres déjà affaiblis, provoquant défoliation et éventuellement mort de l'arbre.
- b. *Cercospora microsora* lors d'été humide, provoquant des tâches noires sur les feuilles.
- c. *Discella desmazierii*, provoquant un dessèchement des rameaux.
- d. *Eucallipterus tiliarium*, puceron provoquant un brunissement et une chute précoce des feuilles sur stations à bilan hydrique défavorables.
- e. etc

253. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

254. Ozone troposphérique

255. Retombées atmosphérique

256. Facteur âge

Les tilleuls ont une longévité atteignant les 200 ans, parfois même 300 ans (Kalliopi et al., 2008; Pigott, 1991).

257. Bibliographie

Kalliopi, R., Dorota, D., Gavriil, S., & Valeriu-Norocel, N. (2008). A review on the ecology and silviculture of limes (*Tillia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. *COST Special issue draft*.

Kübner, R. (2003). Mortality patterns of *Quercus*, *Tilia*, and *Fraxinus* germinants in a floodplain forest on the river Elbe, Germany. *Forest Ecology and Management*, 173, 37-48.

Pigott, C.D. (1991). *Tilia cordata* Miller (*T. europaea* L. pro parte, *T. parvifolia* Ehrh. ex Hoffm., *T. sylvestris* Desf., *T. foemina folio minore* Bauhin). *Journal of Ecology*, 79 (4), 1147-1207.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

258. Ouvrages consultés

Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.

Asshoff, R., Zotz, G., & Korner, C. (2006). Growth and phenology of mature temperate forest trees in elevated CO₂. *Global Change Biology*, 12 (5), 848-861.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Raftoyannis, P.S., & Brus, R. (2008). Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *COST Special issue draft*.

IDF (1981). *Cultiver les arbres feuillus pour récolter un bois de qualité*. Institut pour le Développement Forestier. pp 277, France.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.

Lanier, L., Badré, M., Delabraze, P., Dubourdieu, J., & Flammarion, J.P. (1986). *Précis de sylviculture*. Génie Rural, des Eaux et des Forêts. pp 468, Nancy (France).

Leuzinger, S., Zott, G., Asshoff, R., & Körner, C. (2005). Responses of deciduous forest trees drought in Central Europe. *Tree Physiology*, 25, 641-650.

Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

CHÂTAIGNIER

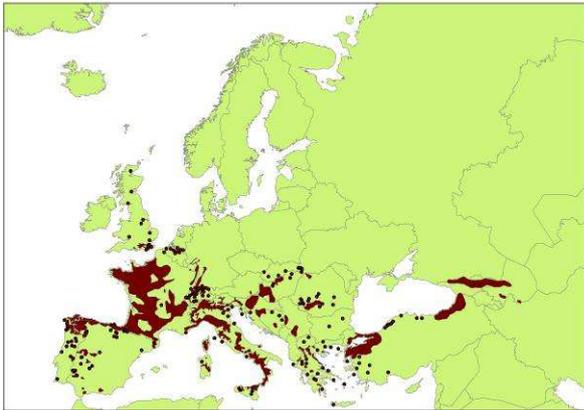
Castanea sativa

Chestnut

259. Distribution géographique

Le châtaignier a été introduit d'Asie mineure en Grèce, puis en Italie jusque l'ouest de l'Europe (Bretaudeau & Fauré, 1990).

La carte ci-dessous reprend l'aire de répartition du châtaignier en Europe (source : www.biodiversity.org/networks/euforgen). Les différentes aires de répartition fournies par EUFORGEN ont été réalisées sur base d'une compilation d'informations (bibliographie existante, communications scientifiques) par des membres de ce réseau. La carte représente donc la situation observable actuellement et donc non une carte de potentialité sylvicole à l'échelle européenne. Dans le cas présent du châtaignier, espèce introduite, l'aire de répartition pourrait être potentiellement plus grande.



260. Température : moyenne annuelle & chaleur

Essence thermophile, la température moyenne annuelle qui lui convient est comprise entre 8 et 15 °C (Alexandrian, 1992; Bacchetta, 1984; Bourgerie & Castaner, 1988; Bretaudeau & Fauré, 1990; IDF, 1981, 1989; Jacamon, 1984; Lanier et al., 1986; Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993).

261. Température : froid

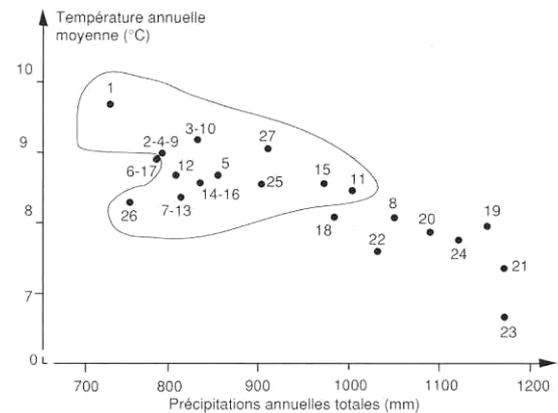
Il ne possède pas une grande résistance aux minima absolus. A partir de - 20°C, des dégâts apparaissent allant jusqu'à la mort des juvéniles ou la mort partielle sur des individus plus âgés (Alexandrian, 1992; Bourgeois et al., 2004; IDF, 1990; Lanier et al., 1986; Masson, 2005; Nageleisen, 1994).

Il est peu sensible aux gelées précoces, mais sensible (adulte et juvénile) aux gelées tardives (Weissen et al., 1996).

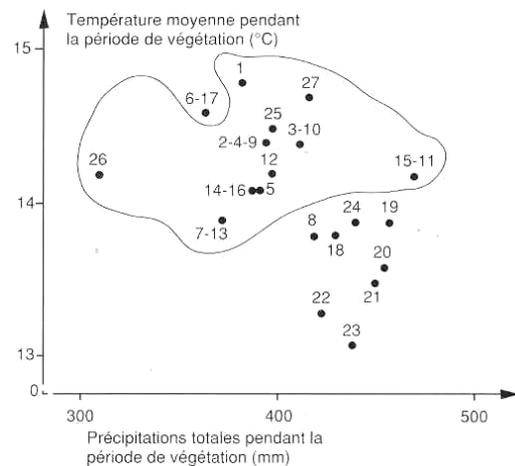
262. Régime hydrique : précipitations annuelles

Les précipitations annuelles moyennes sont comprises entre 700 et 1500 mm. Un minimum de 600 mm est relevé par une étude en Espagne. L'optimum de ces précipitations est estimé à 900 mm (Alexandrian, 1992; Bourgeois et al., 2004; Bretaudeau & Fauré, 1990; Jacamon, 1984; Lopez, 1991; Masson, 2005; Pichard, 1992; Sevrin, 1994).

Le graphe suivant avec données extraites en Région wallonne confirme le caractère thermophile de l'espèce (Weissen et al., 1996) :



Dans le même ordre d'idée, mais ne s'intéressant qu'à la période de végétation (Weissen et al., 1996) :



263. Régime hydrique : épisodes secs

Le Guide pratique du forestier méditerranéen considère qu'il peut résister à 2 mois secs au sens de Gaussens et Bagnouls (Alexandrian, 1992). Ces derniers définissent

comme tout mois sec les mois dont les précipitations sont inférieures à deux fois la température moyenne (Gausсен & Bagnouls, 1957).

Si l'on s'intéresse aux réponses écophysologiques de l'arbre face à un stress, il est admis que le châtaignier possède une préadaptation au stress hydrique (Bauerle et al., 2006).

L'adulte résiste donc bien à une éventuelle sécheresse sévère, mais ce n'est pas le cas du jeune plant de châtaignier (Alexandrian, 1992; Masson, 2005; Pichard, 1992; Sevrin, 1994; Weissen et al., 1996), et ce durant les trois premières années. Une réserve en eau utile du sol d'au moins 100 mm est nécessaire pour qu'il soit en station (Bourgeois et al., 2004; Bourgerie & Castaner, 1988; Masson, 2005; Nageleisen, 1994). Il ne supporte donc pas les sols trop filtrants.

264. Régime hydrique : engorgement temporaire

Un engorgement à moins de 50 cm de profondeur, même temporaire, rend la station impropre à l'implantation du châtaignier. Il est en effet sensible à l'anaérobiose (Bourgeois et al., 2004; IDF, 1989; Masson, 2005; Nageleisen, 1994; Pichard, 1992; Sevrin, 1994).

265. Compaction des sols

Son optimum correspond à des sols meubles, peu compacts. Il est hors station sur des sols très compacts (IDF, 1981, 1989, 1990; Masson, 2005). Il est considéré comme sensible à la compacité et à l'anaérobiose (Weissen et al., 1996).

266. Pauvreté chimique

Point de vue pH, on le rencontre dans une fourchette de 4,5 à 6,5. Cependant, l'optimum se situe pour un pH supérieur à 5,5 (donc exclusion des sols podzoliques) (Bourgeois et al., 2004; Masson, 2005; Pichard, 1992; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993; Sevrin, 1994). Le fichier écologique renseigne une exclusion pour des pH inférieurs à 5 (Weissen et al., 1996).

Quant à la fertilité du sol, il s'accommode d'une fertilité réduite, mais avec conséquences sur la productivité (Laroche et al., 1997; Masson, 2005). Dans une optique de production (jusqu'à 13 m³/ha/an dans les 40 premières années), un sol riche et bien structuré est nécessaire (IDF, 1990; Masson, 2005; Souleres, 1993). Le fichier écologique le présente comme une essence acidocline (Weissen et al., 1996), tandis que la flore forestière française le présente comme une acidophile à large amplitude (Rameau et al., 1989; Rameau et al., 1993). C'est sans la (non)prise en compte du paramètre productivité qui lui vaut cette différence.

Il est considéré comme hors station sur calcaire actif (essence calcifuge) (Bourgeois et al., 2004; Bretaudeau & Fauré, 1990; Rameau et al., 1989).

267. Vent

Il est considéré comme peu sensible aux stations venteuses, à la condition que les paramètres édaphiques (profondeur du sol, compacité) lui permettent un bon ancrage (Alexandrian, 1992; Birot et al., 2009; IDF, 1990; Masson, 2005; Weissen et al., 1996).

268. Neige

Point de vue neige collante et givre, il y est sensible lors du stade juvénile, peu sensible étant adulte (Weissen et al., 1996).

269. Facteurs biotiques

Les champignons suivants (Bourgeois et al., 2004; Lemaire et al., 2005; Masson, 2005; Maurel et al., 2001; Weissen et al., 1996):

- a. *Cryphonectria parasitica* (anciennement appelé *Endothia parasitica* (Endothiose)) produit des chancres sur les branches de l'arbres. Maladie originaire d'Asie.
- b. *Phytophthora cinnamomi* (maladie de l'encre) dans les sols lourds, mal drainés et mouilleux.
- c. *Armillaria mellea* sur sols humides et mal drainés.
- d. *Diplodina castaneae* (le javart), parasite de faiblesse sur station inadéquate.
- e. *Coryneum modonium* provoque des lésions de l'écorce sur des jeunes tiges (< 15 ans).
- f. etc

270. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

271. Ozone troposphérique

272. Retombées atmosphérique

273. Facteur âge

Il possède une très bonne longévité, plus de 1000 ans pour certains individus (Bourgeois et al., 2004; Masson, 2005). Cependant, la production de fruits est beaucoup plus courte : 150 ans en verger et 70 en forêt.

274. Bibliographie

Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.

Bacchetta, R. (1984). Le châtaignier à bois et la mise en valeur des taillis de châtaignier (division "techniques forestières" au CEMAGREF Nogent-sur-Vernisson). *Forêt entreprise*, 22.

Bauerle, W.L., Wang, G.G., Bowden, J.D., & Hong, C.M. (2006). An analysis of ecophysiological responses to drought in American Chestnut. *Annals of Forest Science*, 63, 833-842.

Birot, Y., Landmann, G., & Bonhême, I. (2009). *La forêt face aux tempêtes*. Quae éditions. pp 433, Versailles (France).

Bourgeois, C., Sevrin, E., & Lemaire, J. (2004). *Le châtaignier : un arbre, un bois*. Institut pour le Développement Forestier. pp 347, Paris.

Bourgerly, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Bretauudeau, J. & Fauré, Y. (1990). *Atlas d'arboriculture fruitière*. Tec & Doc - Lavoisier. pp 263, Paris.

Gaussen, H. & Bagnouls, F. (1957). Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie*, 66 (355), 193-220.

IDF (1981). *Cultiver les arbres feuillus pour récolter un bois de qualité*. Institut pour le Développement Forestier. pp 277, France.

IDF (1989). Planter du châtaignier. *Forêt entreprise*, 62, 10-19.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.

Lanier, L., Badré, M., Delabrazé, P., Dubourdieu, J., & Flammarion, J.P. (1986). *Précis de sylviculture*. Génie Rural, des Eaux et des Forêts. pp 468, Nancy (France).

Laroche, A., Freyssac, V., Rahmani, A., & Verger, J.-P. (1997). Growth and mineral content of young chestnut trees under controlled conditions of nutrition. *Annals of Forest Science*, 54, 681-693.

Lemaire, J., Saintonge, F.-X., Robin, C., Rabin, J.-F., & Soutrenon, A. (2005). Dossier : Les pathologies du châtaignier évoluent, ses sylviculture aussi. *Forêt entreprise*, 165 (2005/5), 17-49.

- Lopez, J. (1991). Dossier "Le châtaignier en Europe" : Espagne, de la Galice à la Catalogne, une situation diversifiée. *Forêt entreprise*, 76 (4/1991), 28-32.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Maurel, M., Robin, C., Capdevielle, X., Lousteau, D., & Desprez-Lousteau, M.-L. (2001). Effects of variable root damage caused by *Phytophthora cinnamomi* on water relations of chestnut saplings *Annals of Forest Science*, 58, 639-651.
- Nageleisen, L.-M. (1994). Le dépérissement actuel des feuillus divers: hêtre, merisier, alisier torminal, érable sycomore, peuplier, châtaignier, charme, aulne glutineux. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 554-562.
- Pichard, G. (1992). La régénération naturelle assistée du châtaignier en Bretagne. Une méthode désormais éprouvée. *Forêt de France*, 355 (juillet 1992), 27-29.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., Lecointe, A., Timbal, J., Dupont, P., & Keller, R. (1993). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 2, Montagnes*, pp 2421 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Sevrin, E. (1994). Améliorer les taillis de châtaignier. *Forêt entreprise*, 97 (4/1994), 13-14.
- Souleres, G. (1993). Reboisement : le diagnostic précoce de l'échec. *Revue Forestière Française*, 1993/5, 561-572.
- Weissen, F., Neven, C., Devillez, F., Gathy, P., Gerard, E., Leclerq, A., Rondeux, J., & Steenackers, V. (1996). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 3 : Fiches techniques*. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

275. Ouvrages consultés

- Augusto, L., Ranger, J., & Bonneau, M. (2000). Influence des essences sur la fertilité chimique des sols. Conséquences sur les choix sylvicoles. *Revue Forestière Française*, 52 (6), 507-518.
- Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.
- Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.

- Bédéneau, M. (1988). Croissance du taillis de châtaignier en France : premiers résultats. *Annals of Forest Science*, 45 (3), 265-274.
- Bédéneau, M. (1994). Croissance des taillis de châtaignier en France : utilisation des données de l'Inventaire forestier national. *Annals of Forest Science*, 51, 183-194.
- Bourgeois, C. (1991). Dossier "Le châtaignier en Europe" : Grèce, le châtaignier de la montagne sacrée. *Forêt entreprise*, 76 (4/1991), 40.
- Conodera, M., Krebs, P., Tinner, W., Pradella, M., & Torriani, D. (2004). The cultivation of *Castanea sativa* (Mill.) in Europe, from its origin to its diffusion on a continental scale. *Veget Hist Archaeobot*, 13, 161-179.
- El Kohen, A. & Mousseau, M. (1994). Interactive effects of elevated CO₂ and mineral nutrition on growth and CO₂ exchange of sweet chestnut seedlings (*Castanea sativa*). *Tree Physiology*, 14, 679-690.
- El Kohen, A., Rouhier, H., & Mousseau, M. (1992). Changes in dry weight and nitrogen partitioning induced by elevated CO₂ depend on soil nutrient availability in sweet chestnut (*Castanea sativa* Mill.). *Annals of Forest Science*, 49, 83-90.
- Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Raftoyannis, P.S., & Brus, R. (2008). Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *COST Special issue draft*.
- Leonardi, S., Rapp, M., Failla, M., & Guarnaccia, D. (1996). Biomasse, productivité et transferts de matière organique dans une séquence altitudinale de peuplements de *Castanea sativa* Mill de l'Etna. *Annals of Forest Science*, 53, 1031-1048.
- Maurel, M. (2001). *Impact écophysiological sur jeunes chênes et châtaigniers de l'infection racinaire par Phytophthora cinnamomi*. Doctorat, Université de Paris.
- Mousseau, M. & Enoch, H.Z. (1989). Effect of doubling atmospheric CO₂ concentration on growth, dry matter distribution and CO₂ exchange of 2 yr old sweet chestnut trees (*Castanea sativa* Mill.). *Annals of Forest Science*, 46, 506s-508s.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Radoglou, K. & Raftoyannis, Y. (2001). Effects of desiccation and freezing on vitality and field performance of broadleaved tree species. *Annals of Forest Science*, 58, 59-68.
- Ranger, J., Nys, C., & Bouchon, J. (1990). Les relations entre la fertilité du sol, la production et l'utilisation d'éléments nutritifs dans les taillis de châtaignier. *Acta Oecologica*, 11 (4), 487-501.
- Rubio, A., Escudero, A., & Gandullo, J.M. (1997). Sweet chestnut silviculture in an ecological extreme of its range in the west of Spain (Extremadura). *Annals of Forest Science*, 54, 667-680.

Verger, J.-P. (1999). Characteristics of chestnut coppices in Limousin. *ISHS Acta Horticulturae 494 : II International Symposium on Chestnut*.

Vivin, P., Guehl, J.-M., Clément, A., & Aussenac, G. (1996). The effects of elevated CO₂ and water stress on whole plant CO₂ exchange, carbon allocation and osmoregulation in oak seedlings. *Annals of Forest Science*, 53, 447-459.

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

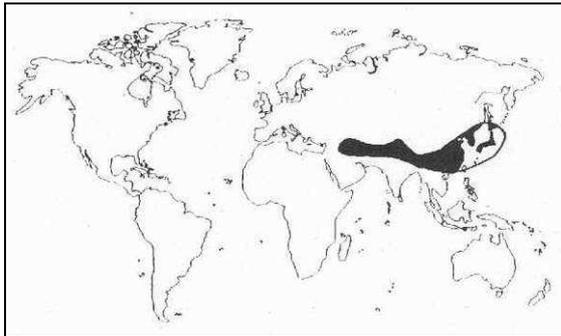
NOYER COMMUN

Juglans regia L.

Persian walnut

276. Distribution géographique

Le noyer commun est une espèce exotique provenant d'Asie et d'une partie du Moyen-Orient (Becquey, 1997; Weissen et al., 1996):



277. Température : moyenne annuelle & chaleur

En ce qui concerne la température moyenne annuelle, le noyer commun demande un climat assez doux (Becquey, 1997; Boudru, 1986; IDF, 1990; Masson, 2005). En Wallonie, il se développe à des températures annuelles moyennes supérieures à 8°C (Weissen et al., 1996).

Durant la saison de végétation, il apprécie la chaleur. A l'optimum, au moins 6 mois sur l'année ont une température moyenne mensuelle supérieure à 10°C (Alexandrian, 1992; Becquey, 1997; Collas, 1994; Jacamon, 1984; Masson, 2005; Mohni et al., 2008).

278. Température : froid

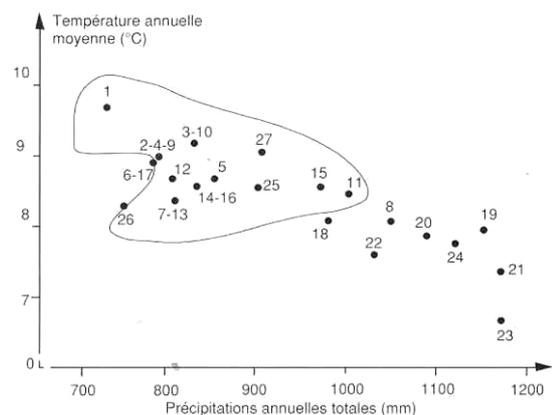
En ce qui concerne l'absolue minima, la littérature cite plusieurs chiffres dont une résistance à - 25°C à la condition d'une provenance génétique résistante et d'un abaissement de température progressif. Il est de manière plus pratique convenu d'éviter la plantation de noyers dans des zones où les températures peuvent atteindre sporadiquement - 15°C (Alexandrian, 1992; Becquey, 1990a, b, 1997; Masson, 2005). Le gel hivernal est d'autant plus dévastateur s'il intervient après une période de redoux.

Il est sensible aux gelées tardives, ainsi qu'aux gelées précoces (CRPF & Champagne-Ardenne, 1990; Weissen et al., 1996).

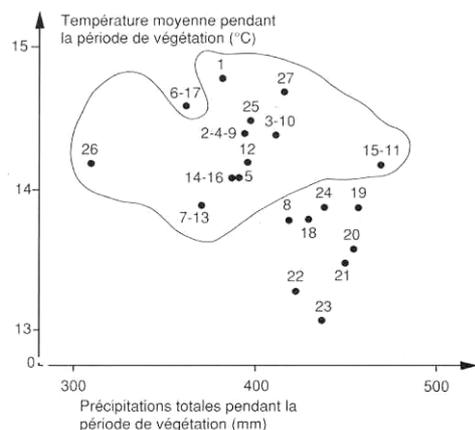
279. Régime hydrique : précipitations annuelles

Les précipitations annuelles doivent être d'au moins 700 mm pour convenir au noyer commun. Celles-ci doivent également être bien réparties sur l'année (Alexandrian, 1992; Becquey, 1997; Masson, 2005; Mohni et al., 2008).

Le graphe suivant avec données extraites en Région wallonne reprend les territoires écologiques convenant au noyer commun (Weissen et al., 1996):



Dans le même ordre d'idée, mais ne s'intéressant qu'à la période de végétation (Weissen et al., 1996):



280. Régime hydrique : épisodes secs

En région méditerranéenne, il redoute les épisodes de sécheresse (Jacamon, 1984; Masson, 2005).

Le fichier écologique des essences le considère comme sensible à la sécheresse au stade juvénile (CRPF & Champagne-Ardenne, 1990; Weissen et al., 1996).

En pratique, il ne redoute pas les épisodes de sécheresse à la condition d'être implanter dans un sol profond (minimum 80-100 cm) et sans contraintes pour

son système racinaire, permettant de puiser en profondeur (Hemery et al., 2008).

La résistance à la sécheresse dépend également de la provenance (Hemery et al., 2008).

281. Régime hydrique : engorgement temporaire

Craignant l'hypoxie, les sols temporairement engorgés d'eau ne lui conviennent pas (Becquey, 1990a, 1991, 1997; Collas, 1994; Crave, 1991; IDF, 1990; Masson, 2005; Weissen et al., 1996).

282. Compaction des sols

Il est très sensible à la compacité des sols. Les sols filtrants ne lui conviennent pas non plus. La présence d'une couche indurée (telle un *Fragipan*) ou d'un lit de pierres lui sont également préjudiciables (Alexandrian, 1992; Bourgerie & Castaner, 1988; Collas, 1994; Crave, 1991; IDF, 1990; Masson, 2005).

En situation non compactée, son système racinaire profond a un rôle de stabilisation en pentes abruptes (Hemery et al., 2008).

283. Pauvreté chimique

Point de vue du pH, une gamme relativement étroite comprise entre 6 et 8 lui convient. Pour des pH supérieurs à 8, des chloroses peuvent apparaître par printemps froid et pluvieux (Alexandrian, 1992; Becquey, 1990a, b, 1997; Bourgerie & Castaner, 1988; Crave, 1991; IDF, 1990; Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Weissen et al., 1996).

Il ne croit efficacement qu'en sol riche, profond d'au moins 80-100 cm, avec une bonne teneur en azote (Alexandrian, 1992; Becquey, 1997; Boudru, 1986; Collas, 1994; Crave, 1991; IDF, 1990; Masson, 2005; Mohni et al., 2008; Rameau et al., 1989). La littérature renseigne également les plantes indicatrices (d'une station pouvant convenir au noyer) suivantes : sureau noir, orme, frêne, érable, ronce, arum, mercuriale, ficaire, ail des ours, ortie.

284. Vent

Les jeunes tiges s'avèrent sensibles aux vents violents. Les conséquences suivantes sont concernées : ralentissement de croissance, déformation du bois, éclatement du tronc (au niveau des fourches), bris de cimes (Alexandrian, 1992; Becquey, 1990b, 1997; Boudru, 1986; Collas, 1994; IDF, 1990; Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Weissen et al., 1996). Le noyer commun est toutefois moins sensible au vent que le noyer noir ou l'hybride.

285. Neige

Concernant la neige collante ou la formation de givre, le noyer commun (adulte et juvénile) est peu sensible à ces deux phénomènes (Weissen et al., 1996).

286. Facteurs biotiques

Les champignons observés sur l'espèce sont (Becquey, 1997; Masson, 2005; Weissen et al., 1996) :

- a. *Armillaria mellea* (maladie du « pourridié ») est un des pathogènes les plus préjudiciables au noyer. Propagation par les racines.
- b. *Phytophthora cinnamomi* (maladie de l'encre) est également très préjudiciable pour l'espèce.
- c. *Phytophthora cambivora* (polypore hérissé) d'une manière plus rare, sur blessure lors de l'élagage.
- d. *Gnomonia leptostyla* (l'antracnose) provoque un dépérissement des feuilles et des rameaux, ce qui induit un ralentissement de croissance.
- e. etc

Les insectes (présents en dans le sud de la France) s'attaquant au noyer sont (Becquey, 1997; Masson, 2005):

- *Zeuzera pyrina* (le zeuzère) au voisinage de vergers.
- *Ceresa bubalus* (les cicadelles bubales) à proximité d'un champs de luzerne.
- *Rhynchites coeruleus* (rhynchite coupe-bourgeons) sectionne les pousses, ce qui provoque un blocage de croissance et la formation de fourches.

Xanthomomas campestris p.v. *juglandis* (la bactériose) provoque des nécroses sur les bourgeons, les fruits, les jeunes rameaux (Becquey, 1997; Masson, 2005; Weissen et al., 1996).

287. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

288. Ozone troposphérique

289. Retombées atmosphérique

290. Facteur âge

291. Bibliographie

- Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.
- Becquey, J. (1990a). Où peut-on planter des noyers ? Quelques principes de base. *Forêt entreprise*, 72 (8/1990), 15-16.
- Becquey, J. (1990b). Quel noyer choisir ? Les facteurs déterminants. *Forêt entreprise*, 72 (8/1990), 17-19.
- Becquey, J. (1991). Planter des noyers en milieu agricole. *Forêt entreprise*, 80 (8/1991), 40-47.
- Becquey, J. (1997). *Les noyers à bois*. Institut pour le Développement Forestier. pp 144, Paris.
- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Collas, P. (1994). Le noyer, un arbre à cultiver à tout prix. *Forêt de France*, 373 (mai 1994), 26-28.
- Crave, M.-F. (1991). Après vingt ans d'effort, où en sont les premières plantations de noyers ? *Forêt entreprise*, 74 (2/1991), 18-22.
- CRPF & Champagne-Ardenne (1990). Les noyers à bois. *Forêt entreprise*, 337 (octobre 1990), 19-20.
- Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Raftoyannis, P.S., & Brus, R. (2008). Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *COST Special issue draft*.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Mohni, C., Pelleri, F., & Hemery, G.E. (2008). The modern silviculture of *Juglans regia* L. : a literature review. *COST Special issue draft*.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Weissen, F., Neven, C., Devillez, F., Gathy, P., Gerard, E., Leclercq, A., Rondeux, J., & Steenackers, V. (1996). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 3 : Fiches techniques*. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

292. Ouvrages consultés

Améglio, T., Cochard, H., Lacointe, A., Vandame, M., Bodet, C., Cruiziat, P., Sauter, J., Ewers, F., & Martignac, M. (2001a). Adaptation to cold temperature and response to freezing in walnut tree. *Acta Horticulturae*, 544 (IV International Walnut Symposium).

Améglio, T., Lacointe, A., Cochard, H., Alves, G., Bodet, C., Vandame, M., Valentin, V., Saint-Joanis, B., Ploquin, S., Cruiziat, P., Julien, J.L., Guilliot, A., & Petel, G. (2001b). Water relations in walnut during winter. *Acta Horticulturae*, 544 (IV International Walnut Symposium).

Becquey, J. (2008). Pour alléger le suivi des plantations : le mélange avec des essences secondaires. *Revue Forestière Française*, LX (2), 289-298.

Becquey, J. & Vidal, C. (2006). Des billes de noyers plus longues avec l'accompagnement ligneux. *Forêt entreprise*, 170, 45-50.

Belloni, V. & Mapelli, S. (2001). Effects of drought or flooding stresses on photosynthesis xylem flux and stem radial growth. *Acta Horticulturae*, 544 (IV International Walnut Symposium).

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologicals et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Bretonneau, J. & Fauré, Y. (1990). *Atlas d'arboriculture fruitière*. Tec & Doc - Lavoisier. pp 263, Paris.

Clark, J.R., Hemery, G.E., & Savill, P.S. (2008). Early growth and form of common walnut (*Juglans regia* L.) in mixture with tree and shrub nurse species in southern England. *Forestry*.

Crave, M.-F. (1990). L'effet du vent sur les noyers. *Forêt entreprise*, 66 (mars 1990), 13-17.

Cutini, A. & Giannini, T. (2009). Effetti della consociazione con *Alnus cordata* sulla funzionalità di impianti di noce comune (*Juglans regia* L.) sottoposti a diradamento. *Forest@*, 6, 29-38.

Dominguez, T. (1986). *Etude préliminaire de la micropropagation du genre Juglans (J. regia, J. nigra, J. cinerea, J. neotropica C.)*. Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.

Dumont, D. (1989). *Etudes des possibilités sylvicoles du noyer (Juglans regia L., J. nigra L. et leurs hybrides) en Belgique* Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.

Fady, B., Ducci, F., Aleta, N., Becquey, J., Diaz Vazquez, R., Fernandez Lopez, F., Jay-Allemand, C., Lefèvre, F., Ninot, A., Panetsos, K., Paris, P., Pisanelli, A., & Rumpf, H. (2003). Walnut demonstrates strong genetic variability for adaptive and wood quality traits in a network of juvenile field tests across Europe. *New Forests*, 25 (3), 211-225.

Hemery, G.E., Savill, P.S., & Pryor, S.N. (2005). Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. *Forest Ecology and Management*, 215 (1-3), 285-294.

IDF (1981). *Cultiver les arbres feuillus pour récolter un bois de qualité*. Institut pour le Développement Forestier. pp 277, France.

Jie, M. & Rongting, X. (1990). Growth and distribution of walnut rooting system in hilly land. *Acta Horticulturae*, 284 (I International Symposium on Walnut Production).

Lanier, L., Badré, M., Delabraze, P., Dubourdieu, J., & Flammarion, J.P. (1986). *Précis de sylviculture*. Génie Rural, des Eaux et des Forêts. pp 468, Nancy (France).

Lyr, H. (1996). Effect of the root temperature on growth parameters of various European tree species. *Annals of Forest Science*, 53, 317-323.

Picon-Cochard, C., Nsourou-Obame, A., Collet, C., Guehl, J.-M., & Ferhi, A. (2001). Competition for water between walnut seedlings (*Juglans regia*) and rye grass (*Lolium perenne*) assessed by carbon isotope discrimination and $\delta^{18}\text{O}$ enrichment. *Tree Physiology*, 21, 183-191.

Poirier, M., Bodet, C., Ploquin, S., Saint-Joanis, B., Lacoïnte, A., & Améglio, T. (2005). Walnut cultivar performance of cold resistance in south central France. *Acta Horticulturae*, 705 (V International Walnut Symposium).

Ribeiro da Silva, M.J., Neves, N., & Crispim, J.M. (1997). Behaviour of some walnut-tree (*Juglans regia*) varieties in "Região agrária da beira litoral". *Acta Horticulturae*, 442 (III International Walnut Congress).

Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

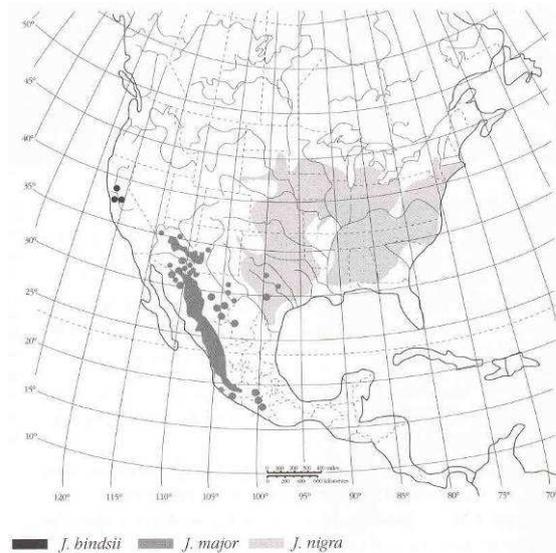
NOYER NOIR

Juglans nigra L.

Black walnut

293. Distribution géographique

Le noyer commun est une espèce exotique provenant d'Amérique (Alexandrian, 1992; Becquey, 1997; Weissen et al., 1996):



294. Température : moyenne annuelle & chaleur

Les préférences du noyer noir vont vers un climat doux et une chaleur estivale prononcée (Boudru, 1986; Bourgery & Castaner, 1988; IDF, 1981; Masson, 2005; Rameau et al., 1989). Il est également renseigné une tendance pour un climat continental (Dumont, 1989).

295. Température : froid

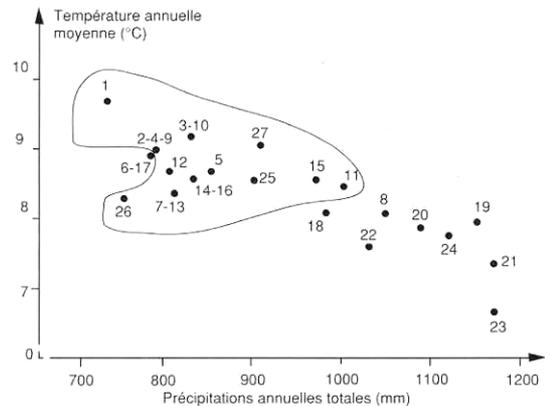
Il est réputé pouvoir résister aux grands froids, notamment jusqu'à des températures minimales de -43°C. En France, il a déjà résisté à un minimum de -28°C (Becquey, 1990, 1997; Boudru, 1986; IDF, 1981; Lanier et al., 1986; Masson, 2005).

Il est très sensible aux gelées tardives et sensible aux gelées précoces (CRPF & Champagne-Ardenne, 1990; Weissen et al., 1996).

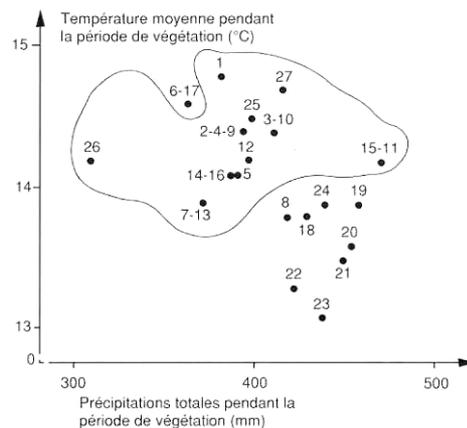
296. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il exige une bonne alimentation en eau (minimum 850 mm), bien répartie tout au long de l'année. Une compensation venant du sol est envisageable (Becquey, 1990, 1997; Boudru, 1986; Crave, 1991; Masson, 2005).

Le graphe suivant avec données extraites en Région wallonne reprend les territoires écologiques convenant au noyer noir (Weissen et al., 1996):



Dans le même ordre d'idée, mais ne s'intéressant qu'à la période de végétation (Weissen et al., 1996):



297. Régime hydrique : épisodes secs

Le stade juvénile est sensible à la sécheresse. En pratique, il ne redoute pas les épisodes de sécheresse à la condition d'être implanter dans un sol profond (minimum 80-100 cm) et sans contraintes pour son système racinaire, permettant de puiser en profondeur (Hemery et al., 2008).

Si les précipitations ne sont pas bien réparties tout au long de l'année, une sécheresse estivale peut provoquer une chute précoce des feuilles (Becquey, 1997; Dumont, 1989; Masson, 2005; Weissen et al., 1996).

La résistance à la sécheresse dépend également de la provenance (Hemery et al., 2008).

298. Régime hydrique : engorgement temporaire

Plus résistant que le noyer commun, il supporte des épisodes engorgés de 10 à 15 jours, une plus longue période entraînant une asphyxie des racines (Becquey, 1997; Bourgerie & Castaner, 1988; Crave, 1991; Masson, 2005). Un pseudogley à trop faible profondeur est également préjudiciable aux racines.

299. Compaction des sols

Seuls les sols meubles et bien aérés lui conviennent. De même que le noyer commun, les sols filtrant ne lui conviennent pas non plus (Becquey, 1997; Bourgerie & Castaner, 1988; Crave, 1991; IDF, 1981; Lanier et al., 1986; Masson, 2005).

En situation non compactée, son système racinaire profond a un rôle de stabilisation en pentes abruptes (Hemery et al., 2008).

300. Pauvreté chimique

Point de vue du pH, une gamme relativement étroite comprise entre 5 et 7,5 lui convient. L'optimum se situe entre 5 et 6 (Becquey, 1990, 1997; Boudru, 1986; Bourgerie & Castaner, 1988; Crave, 1991; IDF, 1981; Masson, 2005).

Il est très exigeant quant à la fertilité de la station. Les milieux alluviaux sont principalement concernés (Boudru, 1986; Crave, 1990; Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Vernier & Le Tacon, 1988). Ses stations de prédilection sont les ormaies-frênaies à chêne pédonculé, mais il est également adapté à la chênaie-frênaie et à l'aulnaie-frênaie (Rameau et al., 1989).

301. Vent

C'est le plus sensible des noyers par rapport aux vents violents. Les conséquences suivantes sont d'application : ralentissement de croissance, déformation du bois, éclatement du tronc (au niveau des fourches), bris de cimes (Alexandrian, 1992; Becquey, 1990, 1997; Boudru, 1986; Crave, 1990; IDF, 1981; Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Weissen et al., 1996).

302. Neige

Concernant la neige collante ou la formation de givre, le noyer commun (adulte et juvénile) est peu sensible à ces deux phénomènes (Weissen et al., 1996).

303. Facteurs biotiques

Plus résistant que le noyer commun, le noyer noir est globalement peu attaqué par les champignons et insectes (Masson, 2005).

Les champignons observés sur l'espèce sont (Becquey, 1997; Masson, 2005; Weissen et al., 1996) :

- a. Le noyer noir est résistant à *Armillaria mellea* (maladie du « pourridié »).
- b. Il est peu sensible à *Gnomonia leptostyla* (l'antracnose).
- c. etc

Les insectes (présents en dans le sud de la France) s'attaquant au noyer sont (Becquey, 1997; Masson, 2005):

- *Zeuzera pyrina* (le zeuzère) au voisinage de vergers.
- *Ceresa bubalus* (les cicadelles bubales) à proximité d'un champs de luzerne.
- Rhynchites coeruleus (rhynchite coupe-bourgeons) sectionne les pousses, ce qui provoque un blocage de croissance et la formation de fourches.

Xanthomomas campestris p.v. *juglandis* (la bactériose) provoque des nécroses sur les bourgeons, les fruits, les jeunes rameaux (Becquey, 1997; Weissen et al., 1996).

304. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

305. Ozone troposphérique

306. Retombées atmosphérique

307. Facteur âge

308. Bibliographie

- Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.
- Becquey, J. (1990). Quel noyer choisir ? Les facteurs déterminants. *Forêt entreprise*, 72 (8/1990), 17-19.
- Becquey, J. (1997). *Les noyers à bois*. Institut pour le Développement Forestier. pp 144, Paris.
- Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.
- Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.
- Crave, M.-F. (1990). L'effet du vent sur les noyers. *Forêt entreprise*, 66 (mars 1990), 13-17.
- Crave, M.-F. (1991). Après vingt ans d'effort, où en sont les premières plantations de noyers ? *Forêt entreprise*, 74 (2/1991), 18-22.
- CRPF & Champagne-Ardenne (1990). Les noyers à bois. *Forêt entreprise*, 337 (octobre 1990), 19-20.
- Dumont, D. (1989). *Etudes des possibilités sylvicoles du noyer (Juglans regia L., J. nigra L. et leurs hybrides) en Belgique* Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Raftoyannis, P.S., & Brus, R. (2008). Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *COST Special issue draft*.
- IDF (1981). *Cultiver les arbres feuillus pour récolter un bois de qualité*. Institut pour le Développement Forestier. pp 277, France.
- Lanier, L., Badré, M., Delabraze, P., Dubourdiou, J., & Flammarion, J.P. (1986). *Précis de sylviculture*. Génie Rural, des Eaux et des Forêts. pp 468, Nancy (France).
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Vernier, F. & Le Tacon, F. (1988). Possibilité d'utilisation de légumineuses arborescentes en forêt tempérée *Revue Forestière Française*, 3/1988, 213-223.

Weissen, F., Neven, C., Devillez, F., Gathy, P., Gerard, E., Leclerq, A., Rondeux, J., & Steenackers, V. (1996). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 3 : Fiches techniques*. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

309. Ouvrages consultés

Becquey, J. (2008). Pour alléger le suivi des plantations : le mélange avec des essences secondaires. *Revue Forestière Française*, LX (2), 289-298.

Bretonneau, J. & Fauré, Y. (1990). *Atlas d'arboriculture fruitière*. Tec & Doc - Lavoisier. pp 263, Paris.

Dominguez, T. (1986). *Etude préliminaire de la micropropagation du genre Juglans (J. regia, J. nigra, J. cinerea, J. neotropica C.)*. Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.

Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.

Mohani, C., Pelleri, F., & Hemery, G.E. (2008). The modern silviculture of *Juglans regia* L. : a literature review. *COST Special issue draft*.

Nicolescu, N.-V. (1998). Considerations regarding black walnut (*Juglans nigra*) culture in the north-west of Romania. *Forestry*, 71 (4), 349-354.

Parker, W.C. & Pallardy, S.G. (1991). Gas exchange during a soil drying cycle in seedlings of four black walnut (*Juglans nigra* L.) families *Tree Physiology*, 9, 339-348.

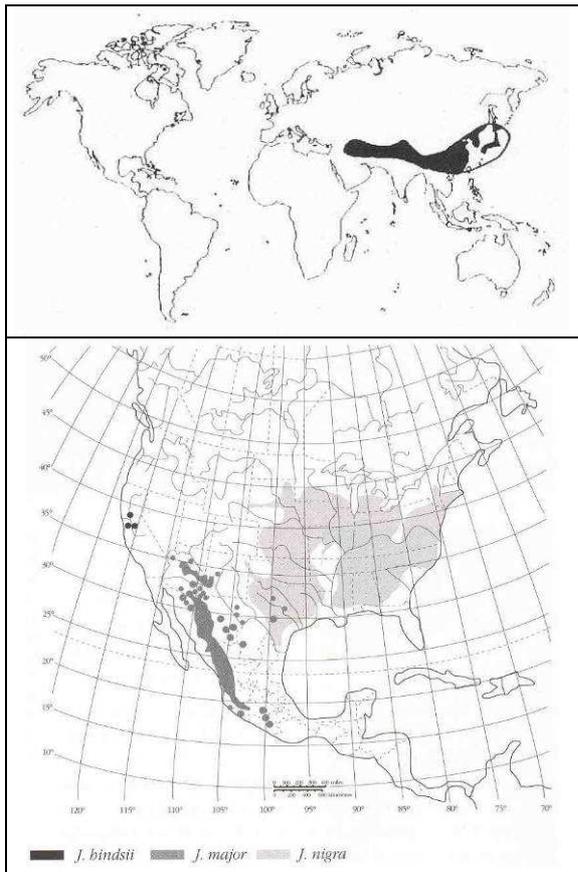
Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

NOYER HYBRIDE

Juglans x intermedia Carr. Var *Vilmoreana*
Hybrid walnut

310. Distribution géographique

C'est un hybride entre le noyer commun (« mâle ») originaire d'Asie (Becquey, 1997; Weissen et al., 1996) et le noyer noir d'Amérique (« femelle ») (Becquey, 1997; Weissen et al., 1996).

**311. Température : moyenne annuelle & chaleur****312. Température : froid**

Il résiste au froid au moins jusqu'à -10°C (Becquey, 1990, 1997), mais on suppose qu'il résiste à des températures plus basses, comparables aux absolues minima des espèces parentes.

313. Régime hydrique : précipitations annuelles

Il exige une bonne alimentation en eau (minimum 800 mm), bien répartie tout au long de l'année. Une

compensation venant du sol est envisageable (Becquey, 1990, 1997; Crave, 1991; Masson, 2005).

314. Régime hydrique : épisodes secs

Il supporte une relative sécheresse estivale, mais demande impérativement une bonne réserve utile en eau du sol (Becquey, 1990, 1997).

315. Régime hydrique : engorgement temporaire

Comme le noyer commun, il ne supporte pas un engorgement en eau, même durant quelques jours (Becquey, 1997; Bourgery & Castaner, 1988; Crave, 1991; Masson, 2005).

316. Compaction des sols

Comme les deux autres espèces de noyer, il exige un sol aéré, peu compact. De même, les sols trop filtrant sont à exclure (Becquey, 1997; Boudru, 1986; Crave, 1991; IDF, 1981; Masson, 2005).

317. Pauvreté chimique

Point de vue pH, une gamme plus élargie que les deux autres espèces est permise : entre 5 et 8. Cependant, son optimum se situe proche de la neutralité, entre 6 et 7 (Becquey, 1990, 1997; Boudru, 1986; CRPF & Champagne-Ardenne, 1990; IDF, 1981; Masson, 2005).

Il est moins exigeant que ses ascendants quant à la fertilité de la station. Cependant, il atteint son optimum de productivité sur les sols les plus fertiles (Becquey, 1990, 1997; Boudru, 1986; CRPF & Champagne-Ardenne, 1990; Masson, 2005).

318. Vent

L'hybride supporte mieux les effets du vent que le commun et le noir. Cependant, sur station fréquemment venteuse, il est à éviter car les mêmes désagréments apparaissent (Becquey, 1990, 1997; Boudru, 1986; Crave, 1990; Masson, 2005) : ralentissement de croissance, déformation de la tige, etc.

319. Neige

Concernant la neige collante ou la formation de givre, le noyer hybride est peu sensible à ces deux phénomènes, tout comme les deux autres espèces.

320. Facteurs biotiques

Plus résistant que le noyer commun, le noyer serait globalement peu attaqué par les champignons et insectes (Masson, 2005).

Les champignons observés sur l'espèce sont (Becquey, 1997; Masson, 2005) :

- a. Le noyer hybride est résistant à *Armillaria mellea* (maladie du « pourridié »).
- b. Il semble peu sensible à *Phytophthora cinnamomi* (maladie de l'encre)
- c. Il est peu sensible à *Gnomonia leptostyla* (l'antracnose).
- d. etc

Les insectes (présents en dans le sud de la France) s'attaquant au noyer sont (Becquey, 1997; Masson, 2005):

- *Zeuzera pyrina* (le zeuzère) au voisinage de vergers.
- *Ceresa bubalus* (les ciccadelles bubales) à proximité d'un champs de luzerne.

321. CO₂

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

322. Ozone troposphérique

323. Retombées atmosphérique

324. Facteur âge

325. Bibliographie

Becquey, J. (1990). Quel noyer choisir ? Les facteurs déterminants. *Forêt entreprise*, 72 (8/1990), 17-19.

Becquey, J. (1997). *Les noyers à bois*. Institut pour le Développement Forestier. pp 144, Paris.

Boudru, M. (1986). *Forêt et sylviculture : Sylviculture appliquée*. Presses agronomiques de Gembloux. pp 244, Gembloux.

Bourgery, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Crave, M.-F. (1990). L'effet du vent sur les noyers. *Forêt entreprise*, 66 (mars 1990), 13-17.

Crave, M.-F. (1991). Après vingt ans d'effort, où en sont les premières plantations de noyers ? *Forêt entreprise*, 74 (2/1991), 18-22.

CRPF & Champagne-Ardenne (1990). Les noyers à bois. *Forêt entreprise*, 337 (octobre 1990), 19-20.

IDF (1981). *Cultiver les arbres feuillus pour récolter un bois de qualité*. Institut pour le Développement Forestier. pp 277, France.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Weissen, F., Neven, C., Devillez, F., Gathy, P., Gerard, E., Leclerq, A., Rondeux, J., & Steenackers, V. (1996). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 3 : Fiches techniques*. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

326. Ouvrages consultés

Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.

Becquey, J. (2008). Pour alléger le suivi des plantations : le mélange avec des essences secondaires. *Revue Forestière Française*, LX (2), 289-298.

Bretauudeau, J. & Fauré, Y. (1990). *Atlas d'arboriculture fruitière*. Tec & Doc - Lavoisier. pp 263, Paris.

Dominguez, T. (1986). *Etude préliminaire de la micropropagation du genre Juglans (J. regia, J. nigra, J. cinerea, J. neotropica C.)*. Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.

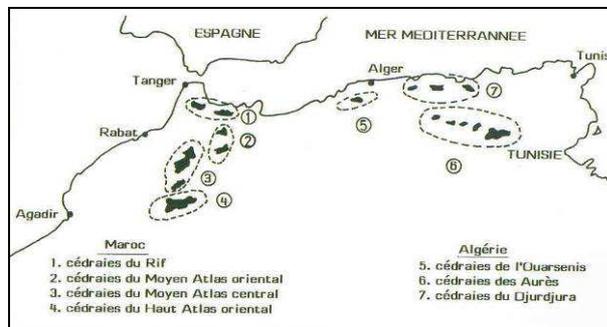
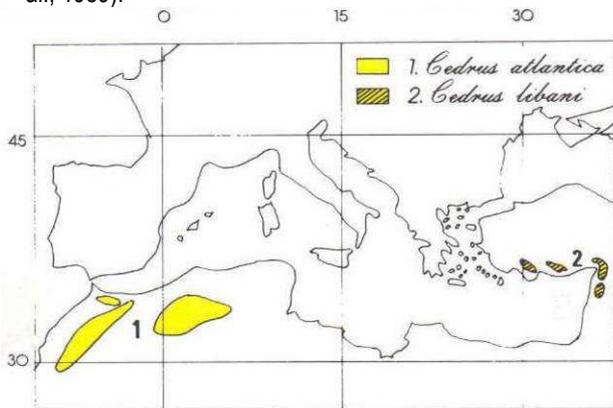
- Dumont, D. (1989). *Etudes des possibilités sylvicoles du noyer (Juglans regia L., J. nigra L. et leurs hybrides) en Belgique* Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Hemery, G.E., Clark, J.R., Aldinger, E., Claessens, H., Malvolti, M.E., O'Connor, E., Raftoyannis, P.S., & Brus, R. (2008). Growing valuable broadleaved tree species in a changing climate - risks and opportunities. *COST Special issue draft*.
- IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.
- Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome II Feuillus*. E.N.G.R.E.F., pp 256, Nancy.
- Lanier, L., Badré, M., Delabraze, P., Dubourdieu, J., & Flammarion, J.P. (1986). *Précis de sylviculture*. Génie Rural, des Eaux et des Forêts. pp 468, Nancy (France).
- Mohani, C., Pelleri, F., & Hemery, G.E. (2008). The modern silviculture of *Juglans regia* L. : a literature review. *COST Special issue draft*.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 1 : Texte explicatif*, pp IX-45 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.

CÈDRE DE L'ATLAS

Cedrus atlantica (Endl.) Carr.
Atlas cedar

327. Distribution géographique

L'aire naturelle du cèdre de l'Atlas reprend les montagnes d'Afrique du Nord (1400 à 2200 m d'altitude) (voir cartes ci-dessous ; source 1^{ère} carte: (Alexandrian, 1992) ; source 2^{ème} carte : (M'Hirit et al., 2006)). Cette essence a été introduite en France en basses et moyennes montagnes (de 600 à 1100 m d'altitude) de la région méditerranéenne. Cette essence est bien adaptée à l'étage bioclimatique du chêne pubescent (Rameau et al., 1989).



328. Température : moyenne annuelle & chaleur

La température moyenne annuelle lui convenant se situe entre 8 et 14°C. Dans son aire naturelle, elle se situe aux environs de 12°C (Alexandrian, 1992; El Hanafi, 1975; M'Hirit et al., 2006; Masson, 2005; Toth, 1970, 1973).

Point de vue chaleur, il supporte une température moyenne estivale qui s'élève jusqu'à 35°C. L'absolue maxima est renseigné à 37°C (Vial, 1974).

329. Température : froid

Deux cas de figure sont à mentionner (Alexandrian, 1992; Bourgerly & Castaner, 1988; Ferrandès, 1986; IDF,

1990; M'Hirit et al., 2006; Masson, 2005; Rameau et al., 1989):

- En atmosphère humide, l'essence subit de gros dégâts (destruction partielle ou totale du feuillage) à partir de - 15°C, et ce tant chez le juvénile que chez l'adulte.
- En atmosphère sèche, l'essence supporte des températures allant jusque - 20°C.

330. Régime hydrique : précipitations annuelles

Dans son aire naturelle (essence d'origine montagnarde), il reçoit entre 400 et 1550 mm de précipitations annuelles moyennes. L'optimum débute entre 700 et 900 mm (M'Hirit et al., 2006; Masson, 2005; Vial, 1974). Il peut donc néanmoins supporter des précipitations en faible quantité (jusqu'à 400 mm) et mal répartie sur l'année (voir section suivante).

Le tableau suivant reprend les précipitations annuelles moyennes, ainsi que les températures maximales et minimales des régions d'origine du cèdre de l'Atlas (tiré de (M'Hirit et al., 2006)) :

Région	Latitude (N)	Limites altitudinales (m)	Précipitations annuelles (mm)	Températures extrêmes (°C)		Précipitations efficaces (%)
				M	m	
Rif occidental	35°01' 35°53'	1.400 à 2.300	1.390 à 1.786	28,3 à 24,1	-5,6 à -0,2	20
Rif central	34°55' 35°35'	1.500 à 2.400	1.257 à 1.707	28,8 à 23,7	-5,6 à -0,4	23
Rif oriental	33°50' 35°07'	1.700 à 2.200	609 à 1.311	26,6 à 24,6	-5,0 à 1,8	27
Moyen Atlas central	33°08' 33°44'	1.500 à 2.000	871 à 1.066	30,9 à 27,6	-4,7 à -0,5	23
Moyen Atlas oriental	33°36' 33°05'	1.800 à 2.000	615 à 927	28,7 à 26,5	-6,4 à -3	33
Haut Atlas oriental	32°16' 32°53'	1.800 à 2.400	499 à 799	29,6 à 23,2	-8,3 à 3,1	47
Aurès Belezma	35°30'	1.350 à 2.300	450 à 900	29,6 à 23,2	-8,3 à 3,1	33
Babors Djurdjura	36°30'	1.400 à 2.200	1.200 à 1.700	26 à 28	11,0 à 3	18
Atlas biadéen	36°25'	1.300 à 2.000	1.100 à 2.000	23 à 30	1,4 à -1	22

331. Régime hydrique : épisodes secs

Il supporte de 2 à 4 mois sans pluies, ainsi que des précipitations annuelles mal réparties, mais ces conditions influencent négativement la croissance et la productivité. Pour une croissance optimale, 200 à 250 mm de précipitations sont nécessaires entre juin et août (Aussenac & Valette, 1982; Bréda, 2004; Jacamon, 1984; M'Hirit et al., 2006; Masson, 2005; Vial, 1974).

332. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il redoute les sols mal drainés et est à proscrire dans toute situation engorgée (Alexandrian, 1992; Bourgerie & Castaner, 1988; IDF, 1990; Masson, 2005).

333. Compaction des sols

Préférant les sols meubles, l'ensemencement et l'installation ultérieure des arbres est compromise (Bourgerie & Castaner, 1988; IDF, 1990; Jacamon, 1984; Masson, 2005; Rameau et al., 1989; Rameau et al., 2008; Ripert, 2007).

334. Pauvreté chimique

Il accepte une large gamme de pH, mais préfère l'acidité (pH proche de 4) et a une moins bonne productivité pour des pH s'approchant de 8 (Alexandrian, 1992; Bourgerie & Castaner, 1988; IDF, 1990; Rameau et al., 1989).

Le cèdre de l'Atlas est une essence pionnière peu exigeante quant à la fertilité, la nature chimique du sol (Alexandrian, 1992; Ducrey, 1988; IDF, 1990; Rameau et al., 1989).

335. Vent

Les individus sains sont résistants aux vents violents et les chablis sont rares (IDF, 1990; Vial, 1974).

336. Neige

Concernant le facteur neige, cette donnée n'est à proprement parlé pas soulevée dans la littérature. Néanmoins, nous savons que les épisodes neigeux sont fréquents dans plusieurs régions de l'aire d'origine du cèdre de l'Atlas (M'Hirit et al., 2006). La durée durant laquelle la neige persiste s'élève à 70-80 jours.

337. Facteurs biotiques

Les insectes s'attaquant aux tiges affaiblies par des extrêmes climatiques (gel, sécheresse, chablis, etc) (Du Merle et al., 1989; Fabre et al., 1999; Guitton & Riou-Nivert, 1987; IDF, 1990; Masson, 2005; Nageleisen, 2007) :

- a. *Cebrobium laportei* (le puceron du cèdre de l'Atlas) avec des dégâts préférentiellement en faible altitude. La piqûre répétée des larves et adultes provoque une réduction du feuillage, une

baisse de croissance et une perturbation de la fructification.

- b. *Cinara cedri*: un autre puceron importé de l'aire d'origine du cèdre de l'Atlas.
- c. *Epinotia cedricida* (tordeuse du chêne) s'attaquant au feuillage.
- d. *Thaumetopoea bonjeani* (processionnaire du cèdre) n'est pas présent en Europe. Mais *Thaumetopoea pityocampa* (processionnaire du pin), qui attaque également le cèdre dans son aire d'origine est présente en France.
- e. *Choristoneura murinana* est une tordeuse qui par l'implantation du cèdre en France a étendu son aire de répartition.
- f. Les *Sirex* ne colonisent que les individus affaiblis.
- g. Etc

Dans le cas du cèdre, espèce relativement récemment introduite, le risque d'introduction de ravageur d'un continent à un autre doit être considéré. Pour le cèdre de l'Atlas, d'origine nord-africaine, le fait d'implanter cette essence sur le circum-méditerranéen atténue les barrières écologiques (Fabre, 1976).

La notion de spécificité relative des ravageurs ne doit également pas être perdue de vue. En effet, à l'intérieur du genre *Cedrus*, un ravageur pourra éventuellement vivre aussi bien sur *C. atlantica* (Maroc, Algérie), *C. libani* (Liban), *C. deodora* (Himalaya) (Fabre, 1976).

338. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

339. Ozone troposphérique

340. Retombées atmosphérique

Le cèdre de l'Atlas est une essence résistante à la pollution urbaine (Rameau et al., 2008).

341. Facteur âge

342. Bibliographie

Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.

Aussenac, G. & Valette, J.C. (1982). Comportement hydrique estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L. et *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. For. Sci.*, 39 (1), 41-62.

Bourgerly, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologicals et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.

Du Merle, P., Brunet, S., Chambon, J.-P., Cornic, J.-F., & Fabre, J.P. (1989). Colonisation d'un végétal introduit (*Cedrus atlantica*) et de nouveaux milieux bioclimatiques par un insecte phytophage : *Choristoneura murinana* (Lep. Tortricidae). *Acta Oecologica*, 10 (4), 289-301.

Ducrey, M. (1988). Réactions à la sécheresse de quelques espèces forestières méditerranéenne. *Revue Forestière Française*, 1998/5, 359-370.

El Hanafi, A. (1975). *Contribution à l'étude dendrométrique du cèdre en région rifaine (Massif de Tizi-Ifri)*. Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux.

Fabre, J.P. (1976). Extension du Cèdre et risques d'attaques d'insectes. *Revue Forestière Française*, XXVIII (4), 261-269.

Fabre, J.P., Mouna, M., Du Merle, P., & Benhalima, S. (1999). Le point sur certains ravageurs du cèdre de l'Atlas en Afrique du Nord, en France et en Europe *Forêt méditerranéenne*, 20 (4), 203-218.

Ferrandès, P. (1986). Cèdres. *Revue Forestière Française*, XXXVIII (sp.), 139-141.

Guitton, J.-L. & Riou-Nivert, P. (1987). Reboisement et sylviculture des résineux *Revue Forestière Française*, 1987/spécial, 56-67.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

Jacamon, M. (1984). *Guide de dendrologie - Tome I Résineux*. E.N.G.R.E.F., pp 88, Nancy.

M'Hirit, O., Benzyane, M., Bariteau, M., Lahlou, B., Kerrouani, H., Abourouch, M., Naggar, M., & al., e. (2006). *Le Cèdre de l'Atlas - Mémoire du temps*. Martaga. pp 288, Spimont (Belgique).

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Nageleisen, L.-M. (2007). Les problèmes phytosanitaires du cèdre en France (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 27-31.

Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., & Gauberville, C. (2008). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 3, Région méditerranéenne*, pp 2426 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Ripert, C. (2007). Autécologie du cèdre de l'Atlas (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 17-20.

Toth, J. (1970). Plus que centenaire et plein d'avenir : le cèdre en France. *Revue Forestière Française*, XXII (3), 355-364.

Toth, J. (1973). La cèdraie de la Verne-Ragusse dans le massif des Maures. *Revue Forestière Française*, XXV (2), 115-120.

Vial, A. (1974). La cèdraie d'Oppède dans le massif du Lubéron (Vaucluse). *Revue Forestière Française*, 1974/2, 124-129.

343. Ouvrages consultés

Abril, M. & Hanano, R. (1998). Ecophysiological responses of three evergreen woody Mediterranean species to water stress. *Acta Oecologica*, 19 (4), 377-387.

Ajbilou, R., Marañón, T., & Arroyo, J. (2006). Ecological and biogeographical analyses of Mediterranean forests of northern Morocco. *Acta Oecologica*, 29 (1), 104-113.

Anonyme (1993). Le cèdre de l'Atlas : répartition du cèdre de l'Atlas en France. *Forêt entreprise*, 93 (6-7), 27-34.

Aubert, C.-G. (1953). Le cèdre dans l'ouest de la France (l'exemple de la Roche-de-Bran). *Revue Forestière Française*, 12, 817-821.

Aussenac, G. & El Nour, M. (1985). Utilisation des contraintes hydriques pour le préconditionnement des plants avant plantation : premières observations pour le cèdre et le pin noir. *Revue Forestière Française*, XXXVII (5), 371-376.

Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.

- Bariteau, M., Vauthier, D., Pommery, J., Rei, F., & Royer, J. (2007). Les meilleures provenances de cèdres pour le reboisement en France méditerranéenne (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 21-26.
- Benchekroun, F. (1994). L'économie de la cèdraie marocaine et son impact sur le développement des collectivités locales. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (27), 713-724.
- Bennagji, Z. (1989). *Influence du stress hydrique sur la croissance racinaire du cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica Manetti) au stade de semis. Etude comparative de provenances algériennes*. Doctorat en Sciences agronomiques, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- Borgaonkar, H.P., Ram, S., & Sikder, A.B. (2009). Assessment of tree-ring analysis of high-elevation *Cedrus deodara* D. Don from Western Himalaya (India) in relation to climate and glacier fluctuations. *Dendrochronologia*, 27 (1), 59-69.
- Boukcim, H., Pages, L., Plassard, C., & Mousain, D. (2001). Root system architecture and receptivity to mycorrhizal infection in seedlings of *cedrus atlantica* as affected by nitrogen source and concentration. *Tree physiology*, 21, 109-115.
- Chevalier, R., Gilbert, J.M., & Ginisty, C. (1998) Introduction des conifères: les enseignements de l'arboretum forestier des Barillons (Loiret, France). In *Ingenieries*, Vol. 13, pp. 29-40. INRA - FAO, France.
- Cointat, M. (1996). Le roman du Cèdre. *Revue Forestière Française*, XLVIII (6), 503-526.
- Courbet, F. (1991). Tarif de cubage à deux entrées pour le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en France. *Revue Forestière Française*, XLIII (3), 215-226.
- Courbet, F., Courdier, J.-M., Mariotte, N., & Courdier, F. (2007). Croissance, production et conduite des peuplements de cèdre de l'Atlas (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 40-44.
- CTGREF (1973). Reboisement en cèdre : premiers résultats expérimental de Monclar (lot). *Revue Forestière Française*, XXV (2), 134-141.
- Dahman, M. & Khouja, M.L. (1994). Résultats des essais d'acclimatation du cèdre en Tunisie. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (27), 129-137.
- Demarteau, M. (2006). *Réponse de Cedrus atlantica aux changements climatiques passés et futurs*. Mémoire en vue de l'obtention du grade de licencié en sciences géologiques, Université de Liège, Liège.
- Ducrey, M. (1994). Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen. Aspects écophysiologicals de sa réaction à la sécheresse. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (139-153).
- Ellatifi, M. (1994). Le cèdre de l'Atlas hors de son aire naturelle : propriétés technologiques. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (27), 683-697.

Fabre, J.P. Le mont Ventoux et l'harmas de J.-H. Fabre. 1.- Les insectes déprédateurs du Cèdre de l'Atlas en France, Vol. 2009. <http://www.apbg.org/aix/docs/VEN.pdf>.

Fabre, J.P., Du Merle, P., & Chalon, A. (1987). Un nouveau ravageur du cèdre en Europe : *Choristoneura murinana*, la tordeuse du sapin. *Revue Forestière Française*, 6, 496.

Fourchy, P. & Lempis, F. (1954). Un exemple de mise en valeur des taillis de chêne pubescent au moyen du cèdre : la Trouhaude (Côte-d'Or). *Revue Forestière Française*, 3, 151-159.

Gonin, P., Delarue, A., & Thévenet, P. (2007). L'avenir du cèdre de l'Atlas en Midi-Pyrénées (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 45-50.

Grieu, P. & Aussenac, G. (1988). Croissance et développement du système racinaire de semis de trois espèces de conifères : *Pseudotsuga menziesii*, *Pseudotsuga macrocarpa* et *Cedrus atlantica*. *Annals of Forest Science*, 45 (2), 117-124.

Grieu, P., Aussenac, G., & Larher, F. (1988). Sécheresse édaphique et concentrations en quelques solutés organiques des tissus foliaire et racinaire de trois espèces de conifères : *Cedrus atlantica* Manetti, *Pseudotsuga macrocarpa* (Torr) Mayr, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Annals of Forest Science*, 45 (4), 311-322.

Guehl, J.M., Aussenac, G., Bouachrine, J., Zimmermann, R., Pennes, J.M., Ferhi, A., & Grieu, P. (1991). Sensitivity of leaf gas exchange to atmospheric drought, soil drought, and water-use efficiency in some Mediterranean *Abies* species. *Canadian Journal of Forest Research*, 21 (10), 1507-1515.

INRA (2005). *Conséquences de la sécheresse et de la canicule de l'été 2003 sur les plantations comparatives gérées par l'I.N.R.A. en Languedoc Roussillon*. INRA Avignon - U.R.F.M. & SRFB - Languedoc-Roussillon, Avignon.

Kabbaj, A. (1979). *Contribution à l'étude des relations entre certains facteurs écologiques, la duraminisation et quelques caractéristiques physiques du bois de cèdre dans quelques stations types du Moyen Atlas marocain*. Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.

Ladjal, M., Deloche, N., Huc, R., & Ducrey, M. (2007). Effects of soil and air drought on growth, plant water status and leaf gas exchange in three Mediterranean cedar species: *Cedrus atlantica*, *C. brevifolia* and *C. libani*. *Trees - Structure and Function*, 21 (2), 201-213.

Ladjal, M., Epron, D., & Ducrey, M. (2000). Effects of drought preconditioning on thermotolerance of photosystem II and susceptibility of photosynthesis to heat stress in cedar seedlings. *Tree physiology*, 20, 1235-1241.

Ladjal, M., Huc, R., & Ducrey, M. (2005). Drought effects on hydraulic conductivity and xylem vulnerability to embolism in diverse species and provenances of Mediterranean cedars. *Tree physiology*, 25, 1109-1117.

- Lecomte, B. (2007). Le cèdre de l'Atlas en Languedoc-Roussillon (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 51-54.
- Lefèvre, F., Fady, B., Fallour-Rubio, D., Ghosn, D., & Bariteau, M. (2004). Impact of founder population, drift and selection on the genetic diversity of a recently translocated tree population. *Nature*, 93, 542-550.
- Legrand, P. (2003). Carence en bore de jeunes plantations de Cèdre de l'Atlas dans le Massif Central. *Revue Forestière Française*, 55 (2), 123-128.
- Legrand, P. (2006). Fertilisation de jeunes Cèdres de l'Atlas carencés en bore dans le Massif central *Revue Forestière Française*, LVIII (6), 509-520.
- M'Hirit, O., Samih, A., & Maiagnoux, M. (1994). Le Cèdre de l'Atlas - *Cedrus atlantica* (Manetti). *Annales de la recherche forestière au Maroc*, 27 (spécial), 1-361.
- Meddour, R. (1994). La cèdraie de l'Atlas blidéen (Algérie). Valeur bioclimatique, syntaxonomique et dynamique. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (27), 105-127.
- Persuy, A. (2005). Face au réchauffement climatique, faudra-t-il réhabiliter certains exotiques. *Revue Forestière Française*, 57 (6), 551-552.
- Prax, J. (1961). Observations sur le développement comparé de plantations de cèdres de l'Atlas au moyen de sujets à racines nues et de sujets élevés en tubes. *Revue Forestière Française*, 7, 489-493.
- Qarro, M. (1994). Etude de la productivité des parcours de la cèdraie du moyen Atlas; Modélisation des exportations d'azote et élaboration d'un indicateur de la nutrition azotée. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (27), 699-711.
- Quezel, P. (1998). Cèdres et cèdraies du pourtour Méditerranéen : Signification bioclimatique et phytogéographique. *Forêt méditerranéenne*, 19 (3), 243-260.
- Riffaud, J.-L. (1998). Le cèdre de l'Atlas dans le Ventoux : l'aménagement de la série des cèdres en forêt communale de Bédoin. *Revue Forestière Française*, L (1), 65-70.
- Riou-Nivert, P. (1999). Le cèdre de l'Atlas : un bel avenir en France. *Forêt entreprise*, 126 (2), 22-24.
- Riou-Nivert, P. (2005). *Les résineux - Tome II : Ecologie et pathologie*. Institut pour le Développement Forestier. pp 447, Paris.
- Riou-Nivert, P. (2007). Le cèdre en 2100 (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 57-58.
- Tinus, R.W. (1996). Root growth potential as an indicator of drought stress history. *Tree physiology*, 16, 795-799.

Toth, J. (1976). Première approche de la production potentielle du cèdre de l'Atlas dans le sud de la France. *Revue Forestière Française*, XXV (5), 381-389.

Toth, J. (2005). *Le cèdre de France*. l'Harmattan. pp 187 + annexes, France.

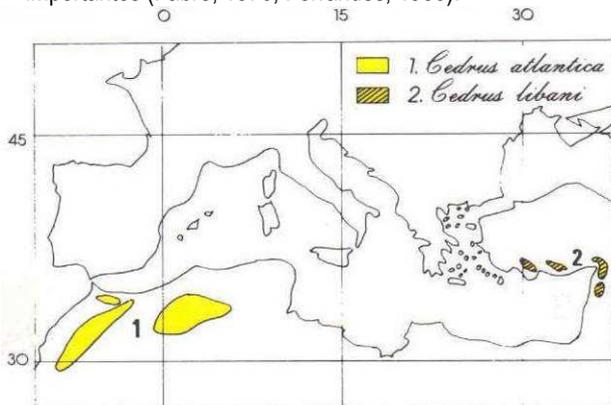
Valette, J.-C. (1983). Influence du mode de plantation de cèdres 1 + 0 G (sac de polyéthylène) sur leur reprise et leur croissance initiale - étude menée en pépinière *Revue Forestière Française*, XXXV (4), 289-294.

Van Lerberghe, P. (2007). Réussir un boisement en cèdre de l'Atlas (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 32-38.

Verbrugge, M., Fabre, J.P., Baculat, B., & Hanocq, J.P. (1989). Microclimatologie de deux peuplements de cèdre *Cedrus atlantica* Manetti dans le sud de la France. *Annals of Forest Science*, 46, 71-83.

CÈDRE DU LIBAN*Cedrus libani* A. Rich. (1823)*Lebanon cedar***344. Distribution géographique**

C'est une espèce montagnaise de la région méditerranéenne orientale (voir carte ci-dessous, source : (Alexandrian, 1992)). Au Liban, il ne reste que quelques îlots au-dessus de 1500 m d'altitude. En Syrie, il apparaît à partir de 1000 m d'altitude. En Turquie, au-dessus de 1250 m, ce sont les surfaces les plus importantes (Fabre, 1976; Ferrandès, 1986).

**345. Température : moyenne annuelle & chaleur**

Le cèdre du Liban affectionne le climat de l'étage supra méditerranéen, alors que le cèdre de l'Atlas s'en accommode (Rameau et al., 2008).

346. Température : froid

Globalement, le cèdre du Liban est considéré comme moins résistant au froid que le cèdre de l'Atlas (Riou-Nivert, 2007). Il ne supporte pas des températures inférieures à -15°C (Riou-Nivert, 2005).

De plus, les provenances libanaises débourent plus tôt au printemps que l'écotype Maroc-Algérie (Atlas), ce qui lui confère une « arme » supplémentaire contre un épisode sec, mais ce qui le rend également sensible aux gelées tardives (Ferrandès, 1986).

347. Régime hydrique : précipitations annuelles**348. Régime hydrique : épisodes secs**

Résistant à une sécheresse estivale dans le même ordre de grandeur que le cèdre de l'Atlas par rapport à nos essences indigènes, des différences relatives subsistent au sein du genre *Cedrus*.

En effet, en ce qui concerne la régulation stomatique, le stress hydrique apparaît d'abord pour le cèdre de l'Himalaya, ensuite pour le cèdre de l'Atlas et enfin en dernier pour le cèdre du Liban (Ferrandès, 1986; Ladjal et al., 2007).

La flore forestière française considère le cèdre du Liban comme moins xérophile que *C. atlantica* (Rameau et al., 2008). Il supporte de fortes sécheresses, à condition qu'elles ne soient pas prolongées.

Enfin, en observant des plants suite à la sécheresse de 2003 en France, il a été mis en évidence que le cèdre du Liban originaire de Turquie se révélait mieux adapté à la sécheresse que le cèdre de l'Atlas, lui-même mieux adapté que le cèdre du Liban originaire du Liban (Bariteau et al., 2007; INRA, 2005). Cependant, la sélection de provenances reste pour *C. libani* un facteur important car la variabilité au sein de cette espèce est plus élevée pour *C. atlantica* (Bariteau et al., 2007; INRA, 2005).

349. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il ne supporte pas les sols argileux, engorgés même temporairement (Rameau et al., 2008).

350. Compaction des sols

La flore forestière française ne proscrit pas le cèdre du Liban sur sols compactés comme elle le fait avec le cèdre de l'Atlas. Elle proscrit toutefois les sols argileux (Rameau et al., 2008).

351. Pauvreté chimique

Tout comme le cèdre de l'Atlas, il accepte une large gamme de pH comprise entre 4 et 8 (Rameau et al., 2008). *C. libani* est une essence pionnière peu exigeante quant à la fertilité, la nature chimique du sol.

C. libani semble garder, contrairement à *C. atlantica*, une productivité optimale sur sols calcaires (Bariteau et al., 2007). Dans ce cas également, une forte variabilité génétique est de mise.

352. Vent**353. Neige****354. Facteurs biotiques**

Les insectes s'attaquant aux tiges affaiblies par des extrêmes climatiques (gel, sécheresse, chablis, etc) ou affaiblissant l'arbre (Fabre, 1976; Fabre et al., 2001; Guitton & Riou-Nivert, 1987; IDF, 1990; Masson, 2005):

- a. *Cebrobium laportei* (le puceron du cèdre de l'Atlas) avec des dégâts préférentiellement en faible altitude. La piqûre répétée des larves et adultes provoque une réduction du feuillage, une baisse de croissance et une perturbation de la fructification.
- b. *Epinotia cedricida* (tordueuse du chêne) s'attaquant au feuillage.
- c. Les *Sirex* ne colonisant que les individus affaiblis.
- d. *Lepidosaphes newsteadi* : Cochenille s'attaquant à *C. libani* en Turquie et à *C. atlantica* en France.
- e. *Dynaspidiotus abieticola* : Cochenille s'attaquant à *C. libani* au Liban.
- f. *Leucaspis nemion* : Cochenille s'attaquant à *C. libani* au Liban.
- g. *Dichelia cedricola*, lépidoptère défoliateur (tordueuse) important en Asie mineure (*C. libani*).
- h. Etc

Dans le cas du cèdre, espèce relativement récemment introduite, le risque d'introduction de ravageur d'un continent à un autre doit être considéré. Pour le cèdre de l'Atlas, d'origine nord-africaine, le fait d'implanter cette essence sur le circum-méditerranéen atténue les barrières écologiques (Fabre, 1976).

La notion de spécificité relative des ravageurs ne doit également pas être perdue de vue. En effet, à l'intérieur du genre *Cedrus*, un ravageur pourra éventuellement vivre aussi bien sur *C. atlantica* (Maroc, Algérie), *C. libani* (Liban), *C. deodora* (Himalaya) (Fabre, 1976).

355. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

356. Ozone troposphérique

357. Retombées atmosphérique

358. Facteur âge

359. Bibliographie

Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.

Bariteau, M., Vauthier, D., Pommery, J., Rei, F., & Royer, J. (2007). Les meilleures provenances de cèdres pour le reboisement en France méditerranéenne (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 21-26.

Fabre, J.P. (1976). Extension du Cèdre et risques d'attaques d'insectes. *Revue Forestière Française*, XXVIII (4), 261-269.

Fabre, J.P., Avci, M., & Chalon, A. (2001). La tortueuse, *Dichelia cedricola* Diakonoff, un ravageur d'Asie Mineure potentiellement important pour le cèdre en France. *Revue Forestière Française*, LIII (2), 131-138.

Ferrandès, P. (1986). Cèdres. *Revue Forestière Française*, XXXVIII (sp.), 139-141.

Guitton, J.-L. & Riou-Nivert, P. (1987). Reboisement et sylviculture des résineux *Revue Forestière Française*, 1987/spécial, 56-67.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

INRA (2005). *Conséquences de la sécheresse et de la canicule de l'été 2003 sur les plantations comparatives gérées par l'I.N.R.A. en Languedoc Roussillon*. INRA Avignon - U.R.F.M. & SRFB - Languedoc-Roussillon, Avignon.

Ladjal, M., Deloche, N., Huc, R., & Ducrey, M. (2007). Effects of soil and air drought on growth, plant water status and leaf gas exchange in three Mediterranean cedar species: *Cedrus atlantica*, *C. brevifolia* and *C. libani*. *Trees - Structure and Function*, 21 (2), 201-213.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Rameau, J.C., Mansion, D., Dume, G., & Gauberville, C. (2008). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 3, Région méditerranéenne*, pp 2426 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.

Riou-Nivert, P. (2005). *Les résineux - Tome II : Ecologie et pathologie*. Institut pour le Développement Forestier. pp 447, Paris.

Riou-Nivert, P. (2007). Le cèdre en 2100 (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 57-58.

360. Ouvrages consultés

- Anonyme (1993). Le cèdre de l'Atlas : répartition du cèdre de l'Atlas en France. *Forêt entreprise*, 93 (6-7), 27-34.
- Benchekroun, F. (1994). L'économie de la cèdraie marocaine et son impact sur le développement des collectivités locales. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (27), 713-724.
- Bréda, N. (2004). La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), 109-131.
- Chevalier, R., Gilbert, J.M., & Ginisty, C. (1998) Introduction des conifères: les enseignements de l'arboretum forestier des Barillons (Loiret, France). In *Ingenieries*, Vol. 13, pp. 29-40. INRA - FAO, France.
- Cointat, M. (1996). Le roman du Cèdre. *Revue Forestière Française*, XLVIII (6), 503-526.
- Ducrey, M. (1994). Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen. Aspects écophysiological de sa réaction à la sécheresse. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (139-153).
- Ducrey, M., Huc, R., Ladjal, M., & Guehl, J.M. (2008). Variability in growth, carbon isotope composition, leaf gas exchange and hydraulic traits in the eastern Mediterranean cedars *Cedrus libani* and *C. brevifolia*. *Tree physiology*, 28, 689-701.
- Fabre, J.P. Le mont Ventoux et l'harma de J.-H. Fabre. 1.- Les insectes déprédateurs du Cèdre de l'Atlas en France, Vol. 2009. <http://www.apbg.org/aix/docs/VEN.pdf>.
- Ladjal, M., Epron, D., & Ducrey, M. (2000). Effects of drought preconditioning on thermotolerance of photosystem II and susceptibility of photosynthesis to heat stress in cedar seedlings. *Tree physiology*, 20, 1235-1241.
- Ladjal, M., Huc, R., & Ducrey, M. (2005). Drought effects on hydraulic conductivity and xylem vulnerability to embolism in diverse species and provenances of Mediterranean cedars. *Tree physiology*, 25, 1109-1117.
- Lefèvre, F., Fady, B., Fallour-Rubio, D., Ghosn, D., & Bariteau, M. (2004). Impact of founder population, drift and selection on the genetic diversity of a recently translocated tree population. *Nature*, 93, 542-550.
- M'Hirit, O., Samih, A., & Maiagnoux, M. (1994). Le Cèdre de l'Atlas - *Cedrus atlantica* (Manetti). *Annales de la recherche forestière au Maroc*, 27 (spécial), 1-361.
- Nageleisen, L.-M. (2007). Les problèmes phytosanitaires du cèdre en France (Dossier climat propice pour le cèdre). *Forêt entreprise*, 174, 27-31.
- Persuy, A. (2005). Face au réchauffement climatique, faudra-t-il réhabiliter certains exotiques. *Revue Forestière Française*, 57 (6), 551-552.

Quezel, P. (1998). Cèdres et cèdraies du pourtour Méditerranéen : Signification bioclimatique et phytogéographique. *Forêt méditerranéenne*, 19 (3), 243-260.

Riou-Nivert, P. (1999). Le cèdre du Liban, un défi au temps... *Forêt entreprise*, 125 (1), 22-24.

Toth, J. (1970). Plus que centenaire et plein d'avenir : le cèdre en France. *Revue Forestière Française*, XXII (3), 355-364.

Toth, J. (2005). *Le cèdre de France*. l'Harmattan. pp 187 + annexes, France.

CÈDRE DE L'HIMALAYA

Cedrus deodora Loud. (1938)

Himalayan cedar

361. Distribution géographique

Espèce asiatique qui recouvre plus 500.000 ha sur le versant sud de l'Himalaya. Cette aire s'étend du Népal, jusqu'en Afghanistan (Ferrandès, 1986), à partir de 1.700 m d'altitude. Cette espèce « monte » jusqu'à 3.500 m dans les massifs himalayens plus continentaux (Fabre, 1976).

362. Température : moyenne annuelle & chaleur

Le tableau suivant (tiré de (Riou-Nivert, 2005)) reprend les différentes régions climatiques de France. Pour chaque région, l'aptitude est évaluée comme suit : rouge = essence inadaptée ; orange = essence possible ; vert = essence adaptée.

Zone climatique	C. atlantica	C. deodora	C. libani
1 Climat océanique (littoral) : hiver tempéré à doux, été frais à chaud	vert	orange	orange
2 Climat océanique à semi-océanique : hiver frais à très frais, été frais	vert	orange	orange
3 Climat océanique : hiver frais à très frais, été chaud	vert	orange	orange
4 Climat semi-océanique : hiver très frais, été chaud à frais	orange	orange	orange
5 Climat continental à semi-continental : hiver froid, été chaud	orange	orange	orange
6 Climat semi-continental à semi-océanique : hiver très frais, été chaud	orange	orange	orange
7a Climat méditerranéen : zone de l'olivier, hiver doux, été chaud à très chaud	orange	orange	orange
7b Climat méditerranéen : zone de l'orange, hiver très doux, été chaud à très chaud	orange	orange	orange
8 Climat montagnard : hiver très froid, été frais à chaud	orange	orange	orange

363. Température : froid

En ce qui concerne les minima absolus, le cèdre de l'Himalaya ne supporte pas des températures inférieures à -15°C (Riou-Nivert, 2005).

364. Régime hydrique : précipitations annuelles

365. Régime hydrique : épisodes secs

Résistant à une sécheresse estivale dans un relatif même ordre de grandeur que le cèdre de l'Atlas par rapport à nos essences indigènes, des différences relatives subsistent au sein du genre *Cedrus*. En effet, en ce qui concerne la régulation stomatique, le stress hydrique apparaît d'abord pour le cèdre de l'Himalaya, ensuite pour le cèdre de l'Atlas et enfin en dernier pour le cèdre du Liban (Ferrandès, 1986).

Confirmant le paragraphe précédent, la résistance globale à la sécheresse du cèdre de l'Himalaya est considérée comme inférieure à celles de *C. atlantica* et *C. libani* (Riou-Nivert, 2005).

366. Régime hydrique : engorgement temporaire

Il redoute les sols mal drainés et est à proscrire dans toute situation engorgée (Alexandrian, 1992; Bourgerly & Castaner, 1988; IDF, 1990; Masson, 2005).

367. Compaction des sols

Tout comme le cèdre de l'Atlas et celui du Liban, les sols compactés et non aérés lui sont préjudiciables (Riou-Nivert, 2005).

368. Pauvreté chimique

Cedrus deodora est plus affiché acidophile que *C. atlantica* et *C. libani* (Riou-Nivert, 2005). De plus, c'est une essence intolérante face aux sols calcaires.

369. Vent

Riou-nivert (Riou-Nivert, 2005) lui attribue une plus grande résistance au vent que pour *C. atlantica* et *C. libani*.

370. Neige

Concernant le facteur neige, cette donnée n'est à proprement parlé pas soulevée dans la littérature. Néanmoins, nous savons que les épisodes neigeux sont fréquents dans son aire d'origine (Himalaya).

371. Facteurs biotiques

Les insectes s'attaquant aux tiges affaiblies par des extrêmes climatiques (gel, sécheresse, chablis, etc) ou affaiblissant l'arbre (Fabre, 1976; Guitton & Riou-Nivert, 1987; IDF, 1990; Masson, 2005):

- a. *Cebrobium laportei* (le puceron du cèdre de l'Atlas) avec des dégâts préférentiellement en faible altitude. La piqûre répétée des larves et adultes provoque une réduction du feuillage, une

baisse de croissance et une perturbation de la fructification.

- b. *Epinotia cedricida* (tordueuse du chêne) s'attaquant au feuillage.
- c. Les *Sirex* ne colonisant que les individus affaiblis.
- d. Espèce introduite en Turquie à partir du cèdre de l'Himalaya, *Acalla undulana* (une tordueuse) affaiblit les arbres qui sont ensuite attaqués par des xylophages.
- e. Etc

Dans le cas du cèdre, espèce relativement récemment introduite, le risque d'introduction de ravageur d'un continent à un autre doit être considéré. Pour le cèdre de l'Atlas, d'origine nord-africaine, le fait d'implanter cette essence sur le circum-méditerranéen atténue les barrières écologiques (Fabre, 1976).

La notion de spécificité relative des ravageurs ne doit également pas être perdue de vue. En effet, à l'intérieur du genre *Cedrus*, un ravageur pourra éventuellement vivre aussi bien sur *C. atlantica* (Maroc, Algérie), *C. libani* (Liban), *C. deodora* (Himalaya) (Fabre, 1976).

372. CO2

L'influence de ce facteur reste encore difficile à estimer. Il doit être considéré en relation avec l'augmentation de température et surtout l'augmentation des épisodes secs.

373. Ozone troposphérique

374. Retombées atmosphérique

375. Facteur âge

376. Bibliographie

Alexandrian, D. (1992). *Essences forestières : Guide pratique du forestier méditerranéen français (2ème édition)*. CEMAGREF. Aix-en-Provence.

Bourger, C. & Castaner, D. (1988). *Les plantations d'alignement - le long des routes, chemins, canaux, allées*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). Paris.

Fabre, J.P. (1976). Extension du Cèdre et risques d'attaques d'insectes. *Revue Forestière Française*, XXVIII (4), 261-269.

Ferrandès, P. (1986). Cèdres. *Revue Forestière Française*, XXXVIII (sp.), 139-141.

Guitton, J.-L. & Riou-Nivert, P. (1987). Reboisement et sylviculture des résineux *Revue Forestière Française*, 1987/spécial, 56-67.

IDF (1990). *Les terrains boisés - leur mise en valeur*. IDF (Institut pour le Développement Forestier). pp 348, Nancy.

Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.

Riou-Nivert, P. (2005). *Les résineux - Tome II : Ecologie et pathologie*. Institut pour le Développement Forestier. pp 447, Paris.

377. Ouvrages consultés

Anonyme (1993). Le cèdre de l'Atlas : répartition du cèdre de l'Atlas en France. *Forêt entreprise*, 93 (6-7), 27-34.

Bencheikroun, F. (1994). L'économie de la cèdraie marocaine et son impact sur le développement des collectivités locales. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (27), 713-724.

Chevalier, R., Gilbert, J.M., & Ginisty, C. (1998) Introduction des conifères: les enseignements de l'arboretum forestier des Barillons (Loiret, France). In *Ingenieries*, Vol. 13, pp. 29-40. INRA - FAO, France.

Cointat, M. (1996). Le roman du Cèdre. *Revue Forestière Française*, XLVIII (6), 503-526.

Dahman, M. & Khouja, M.L. (1994). Résultats des essais d'acclimatation du cèdre en Tunisie. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (129-137).

Ducrey, M. (1994). Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen. Aspects écophysologiques de sa réaction à la sécheresse. *Annales de la recherche forestière au Maroc*, T (139-153).

Fabre, J.P. Le mont Ventoux et l'harma de J.-H. Fabre. 1.- Les insectes déprédateurs du Cèdre de l'Atlas en France, Vol. 2009. <http://www.apbg.org/aix/docs/VEN.pdf>.

Lefèvre, F., Fady, B., Fallour-Rubio, D., Ghosn, D., & Bariteau, M. (2004). Impact of founder population, drift and selection on the genetic diversity of a recently translocated tree population. *Nature*, 93, 542-550.

M'Hirit, O., Samih, A., & Maiagnoux, M. (1994). Le Cèdre de l'Atlas - *Cedrus atlantica* (Manetti). *Annales de la recherche forestière au Maroc*, 27 (spécial), 1-361.

Persuy, A. (2005). Face au réchauffement climatique, faudra-t-il réhabiliter certains exotiques. *Revue Forestière Française*, 57 (6), 551-552.

Quezel, P. (1998). Cèdres et cèdraies du pourtour Méditerranéen : Signification bioclimatique et phytogéographique. *Forêt méditerranéenne*, 19 (3), 243-260.

Toth, J. (1970). Plus que centenaire et plein d'avenir : le cèdre en France. *Revue Forestière Française*, XXII (3), 355-364.

Toth, J. (2005). *Le cèdre de France*. l'Harmattan. pp 187 + annexes, France.

Partie 3 – Analyse stationnelle et développement d'un catalogue des stations

Comme expliqué en introduction, le catalogue est l'outil choisi pour décrypter les conditions écologiques de la forêt de Soignes dans un double objectif :

- identifier, pour la gestion forestière, les différents milieux avec leurs caractéristiques propres, et qui méritent une gestion différenciée ;
- spatialiser les aptitudes des essences forestières, tant actuelles que selon les projections dans le cadre de ce que l'on sait du climat à la fin du XXI^e siècle.

L'établissement du catalogue des stations passe par 3 étapes :

- l'identification des caractéristiques générales de la zone d'étude à partir des données existantes ;
- l'identification des variables écologiques qui apparaissent déterminantes en forêt de Soignes, et une étude particulière pour approfondir les connaissances ;
- le découpage du territoire en types de stations, basées fortement sur la notion de découpage géomorphopédologique.

Cette partie est structurée en 3 chapitres :

- la présentation générale de la zone d'étude (chapitre 1)
- la méthode de l'analyse approfondie des conditions écologiques (chapitre 2)
- les résultats de cette analyse approfondie et leur discussion, aboutissant à l'élaboration proprement dite du catalogue de stations (chapitre 3).

Chapitre 6. Présentation de la zone d'étude

6.1. Situation géographique

Le massif de la forêt de Soignes se situe au Sud de Bruxelles, à environ 50°46' de latitude Nord et 4°25' de longitude Est. Il se répartit sur une partie des communes suivantes : Auderghem, Watermal-Boisfort, Uccle, Tervuren, Rhode-St-Genèse, Hoeilaart, Woluwe-St-Pierre.

Ce massif représente une des plus vastes hêtraies de Belgique avec une surface 4383 ha (plus ou moins 5000 ha si l'on considère les parcs forestiers et bois privés). Dans le projet qui nous occupe, seule la partie sous tutelle de la région bruxelloise a été étudiée. Sur le plan administratif, le massif sonien se répartit entre les trois régions : 2454 ha pour la Région flamande (soit 56% du massif), 1654 ha pour la Région bruxelloise (soit 38%) et 275 ha pour la Région wallonne (soit 6%). Le cas particulier du bois des Capucins (311 ha) relève de la Donation royale. La Figure 25 reprend la délimitation de la zone d'étude :

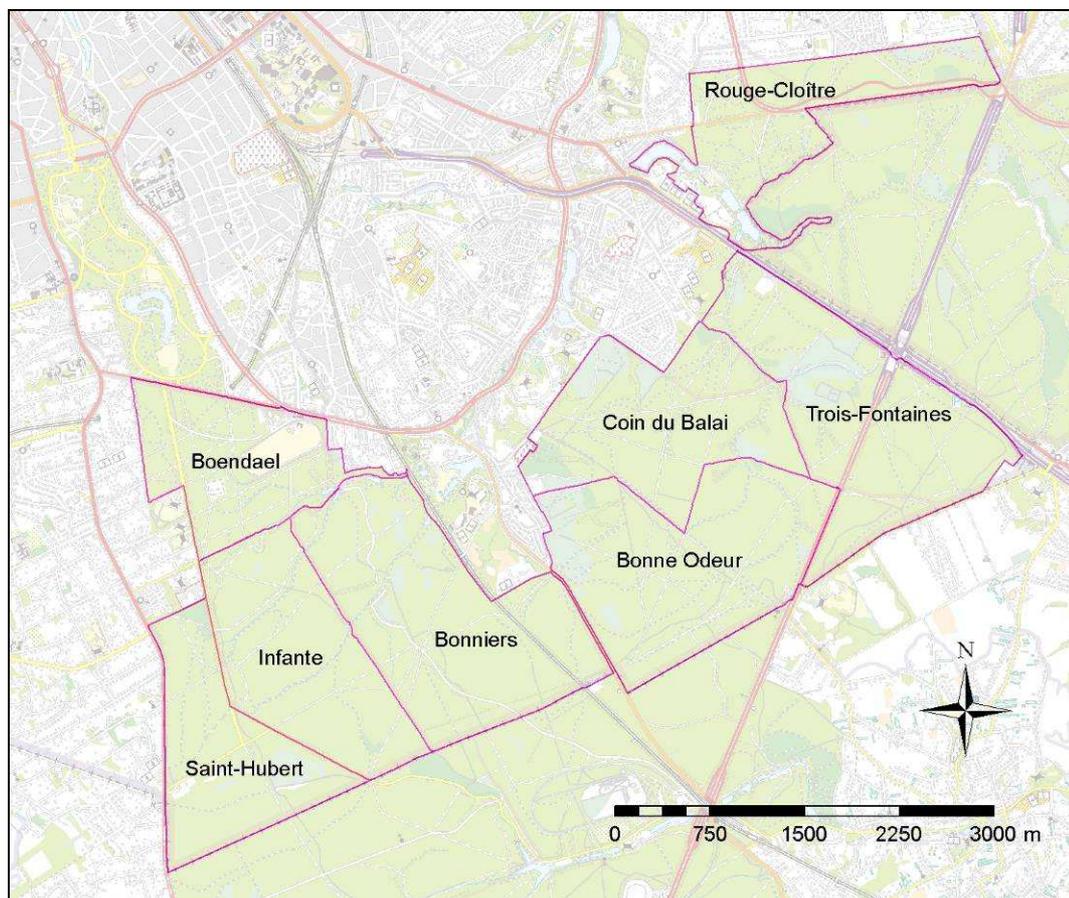


Figure 25 - Délimitation de la zone d'étude et des triages correspondants.

6.2. Contexte écologique

6.2.1. Climat

La forêt de Soignes se situe en Moyenne Belgique, le climat est de type maritime tempéré à hiver doux. Les pluies sont généralement bien réparties sur l'année, les gelées tardives sont relativement fréquentes. Ce climat peut être illustré par le climatogramme d'Uccle, station située à proximité immédiate de la Forêt de Soignes (figure 25 bis).

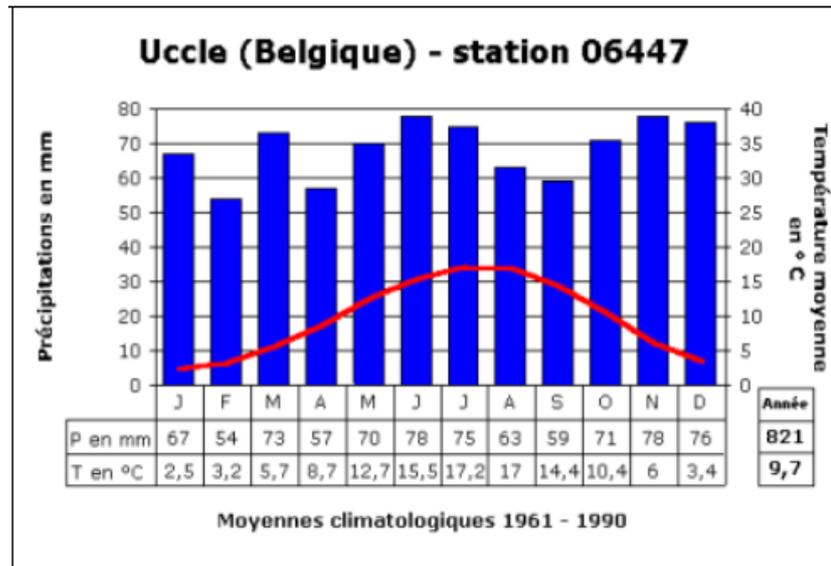


Figure 25 bis – Climatogramme de la station de Uccle

6.2.2. Topographie

Au sein de la forêt de Soignes, l'altitude varie entre 60 et 120 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le massif se situe sur un plateau relativement plat. En effet, la carte des pentes indique que trois quarts de la surface ont une pente inférieure à 6°. Autrement, la pente varie dans une gamme de 6 à 15°, très rarement supérieure à 15°.

Les figures 26 à 28 représentent de différentes manières le relief de la zone d'étude.

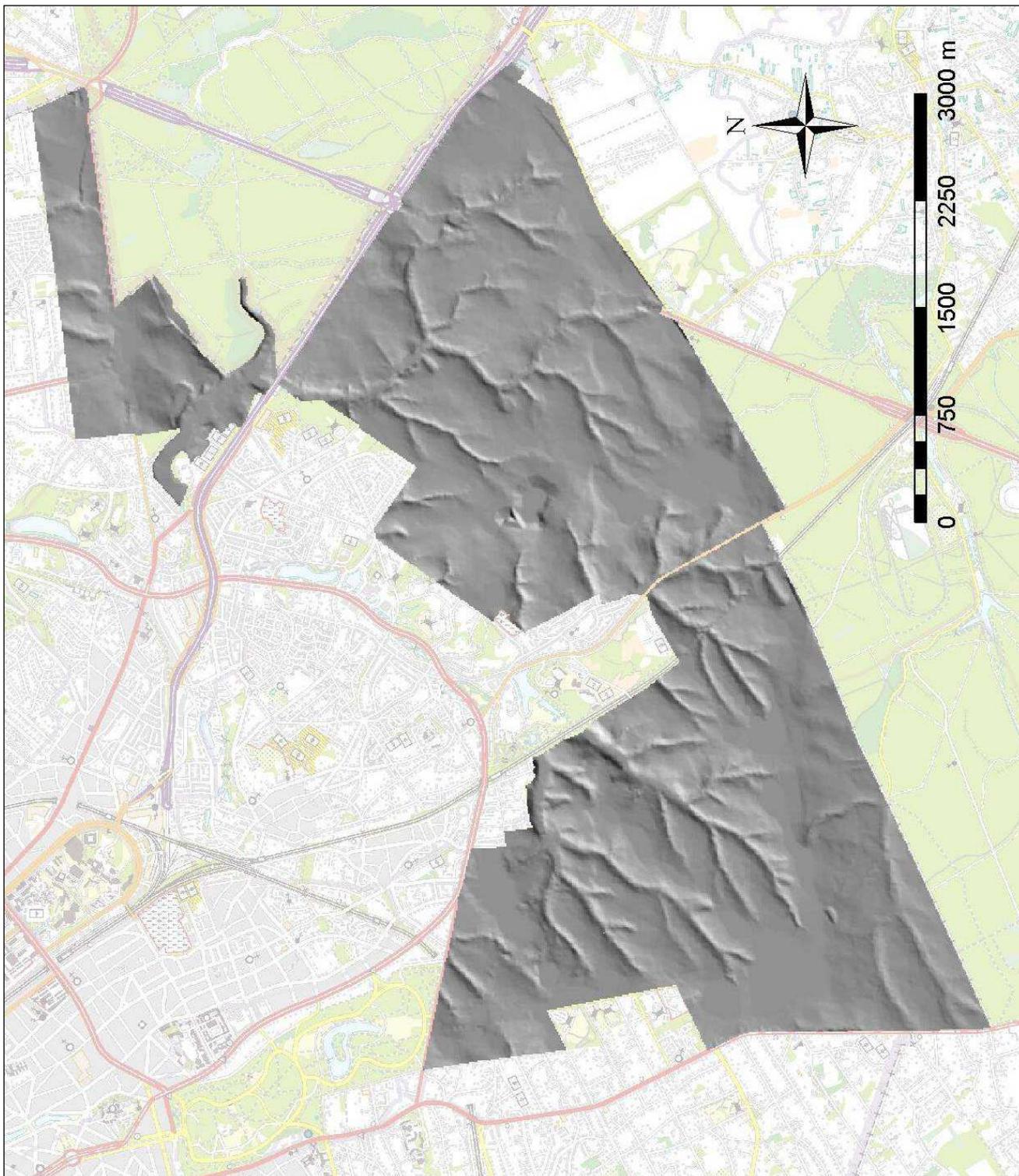


Figure 26 - représentation 3D du relief en présence sur la zone d'étude.

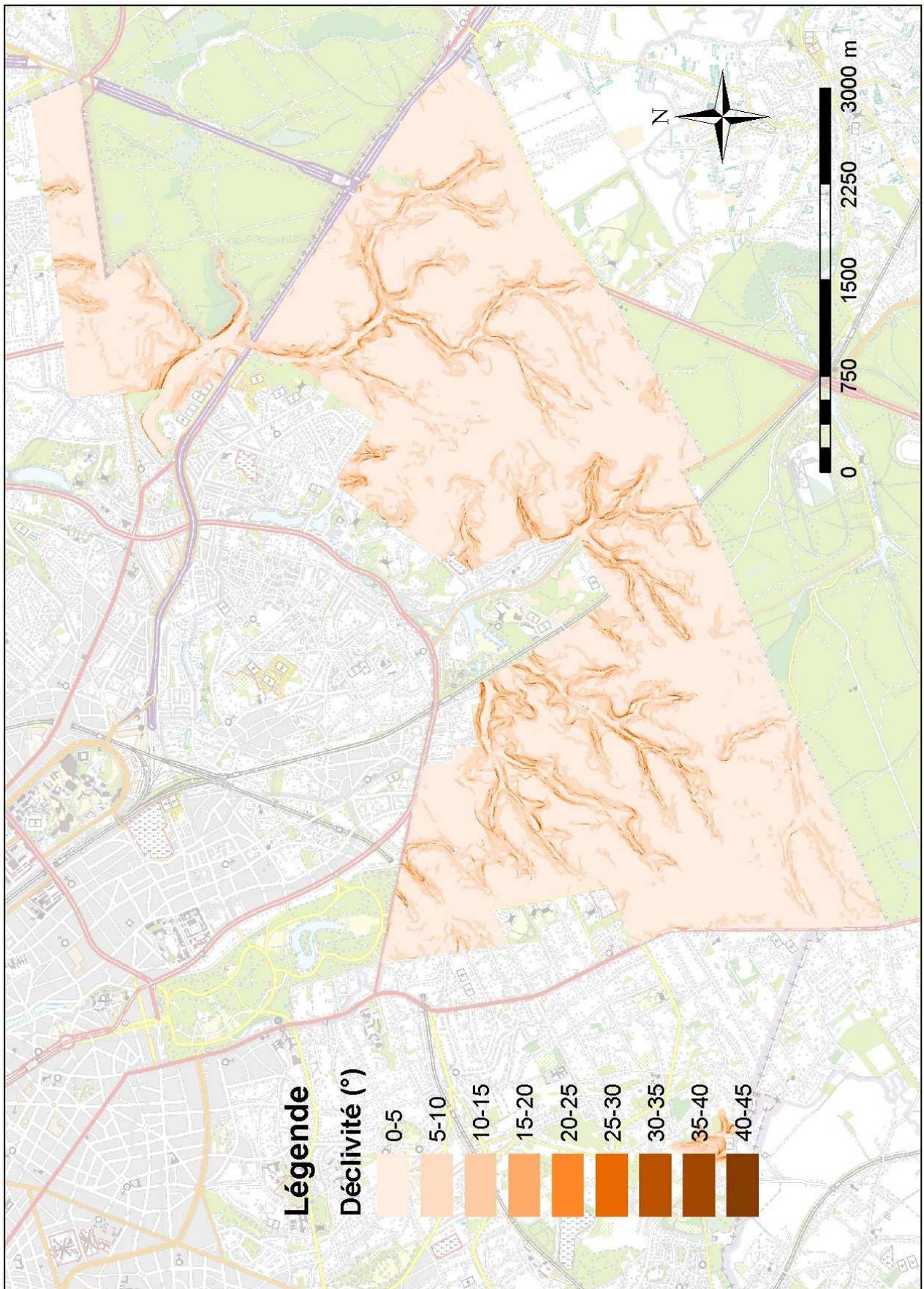


Figure 27 - Carte des pentes présentes sur la zone d'étude. Carte obtenue avec la fonction *slope* appliquée au MNT.

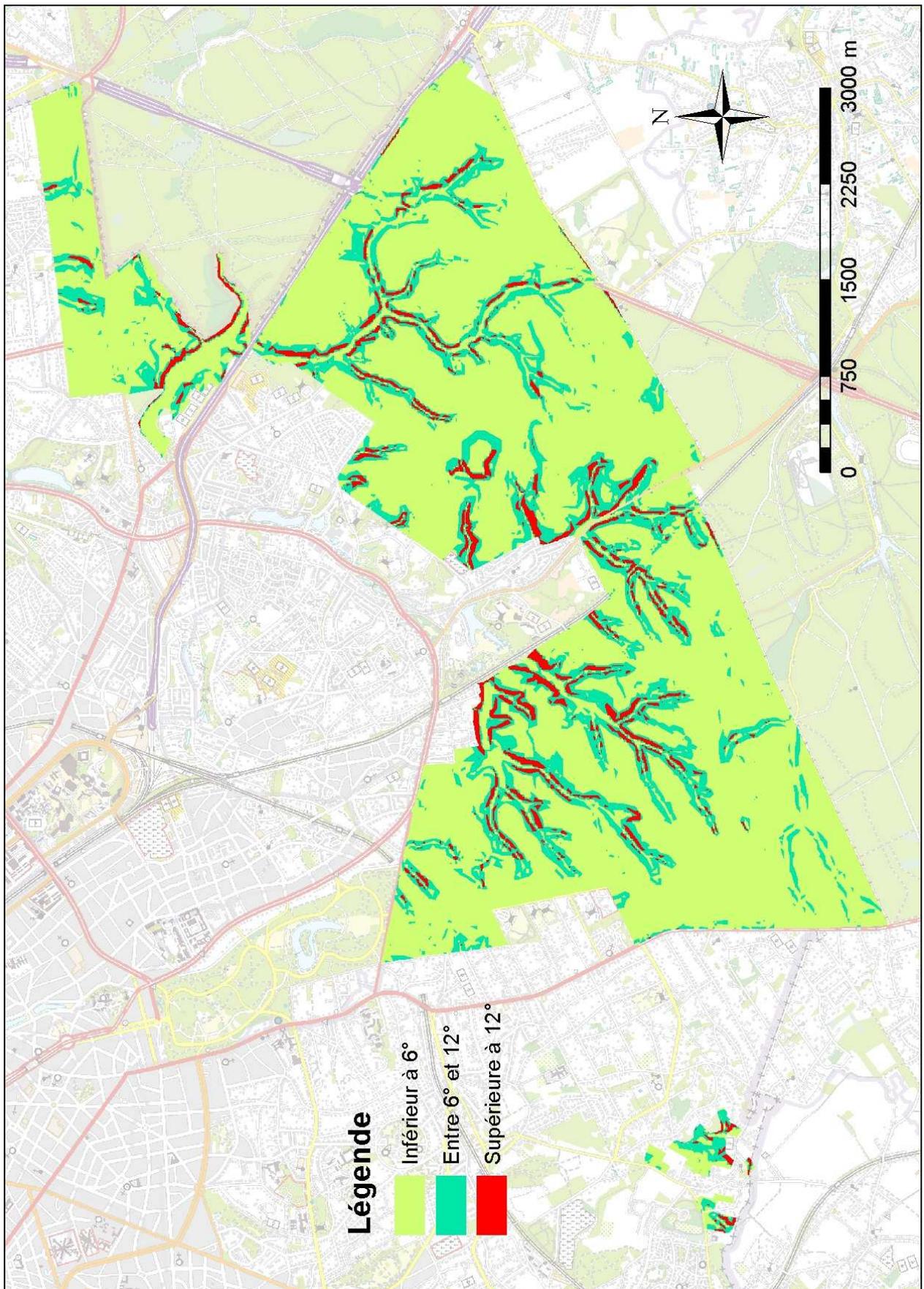


Figure 28 - Carte des pentes reclassifiées en 3 catégories: inférieures à 6° ; entre 6 et 12° ; supérieures à 12°.

6.2.3. Géologie

Les principales couches géologiques dominant la partie bruxelloise de la forêt de Soignes sont les suivantes (de la plus récente à la plus ancienne) : *Tongrien*, *Asschien*, *Lédien*, *Bruxellien*. Elles proviennent du Tertiaire, de l'Eocène. Le *Bruxellien* et le *Lédien* sont de nature sableuse. Le *Tongrien* et l'*Asschien* sont un mélange d'argile et de sable. Ces deux dernières couches entraînent la formation d'une nappe d'eau perchée, participant à la mauvaise stabilité du hêtre en forêt de Soignes. Il est également signalé la présence d'une nappe permanente dans les sables du *Bruxellien*, entre 30 et 50 mètres de profondeur.

Aucun cours d'eau ne traverse le massif, mais quelques ruisseaux prennent naissance dans les vallons les plus profonds. La zone d'étude comprend de nombreux vallons secs, sans cours d'eau, que l'on nomme « delle ». L'origine de ces vallons est due aux événements géologiques et géomorphologiques de la période des glaciations (Langohr & Cuyckens, 1986). Ces delles sont nombreuses en forêt de Soignes et ne se retrouvent pas ailleurs. En effet, la permanence de l'état boisé de la forêt de Soignes a préservé le relief accidenté d'origine glaciaire (Langohr & Cuyckens, 1986). La Figure 29 reprend le schéma d'un de ces vallons secs. La Figure 30 et le Tableau 15 reprennent les différentes géologies en jeu sur la zone d'étude.

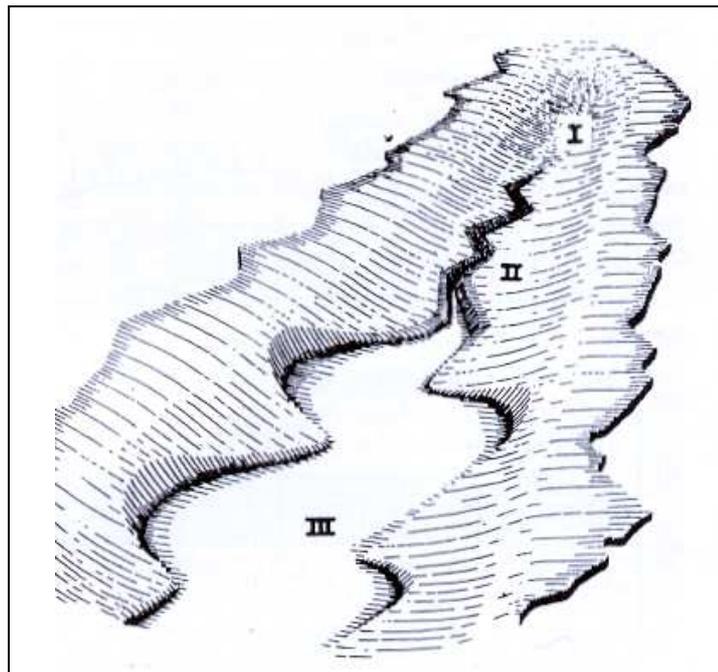


Figure 29 - Schéma d'un vallon sec en forêt de Soignes (tiré de Langohr 1986). I. Profil concave de la tête de vallée ; II. En aval se crée un petit ravin en forme de V ; III. Creusement latéral du fond de vallée plat par formation de méandres.

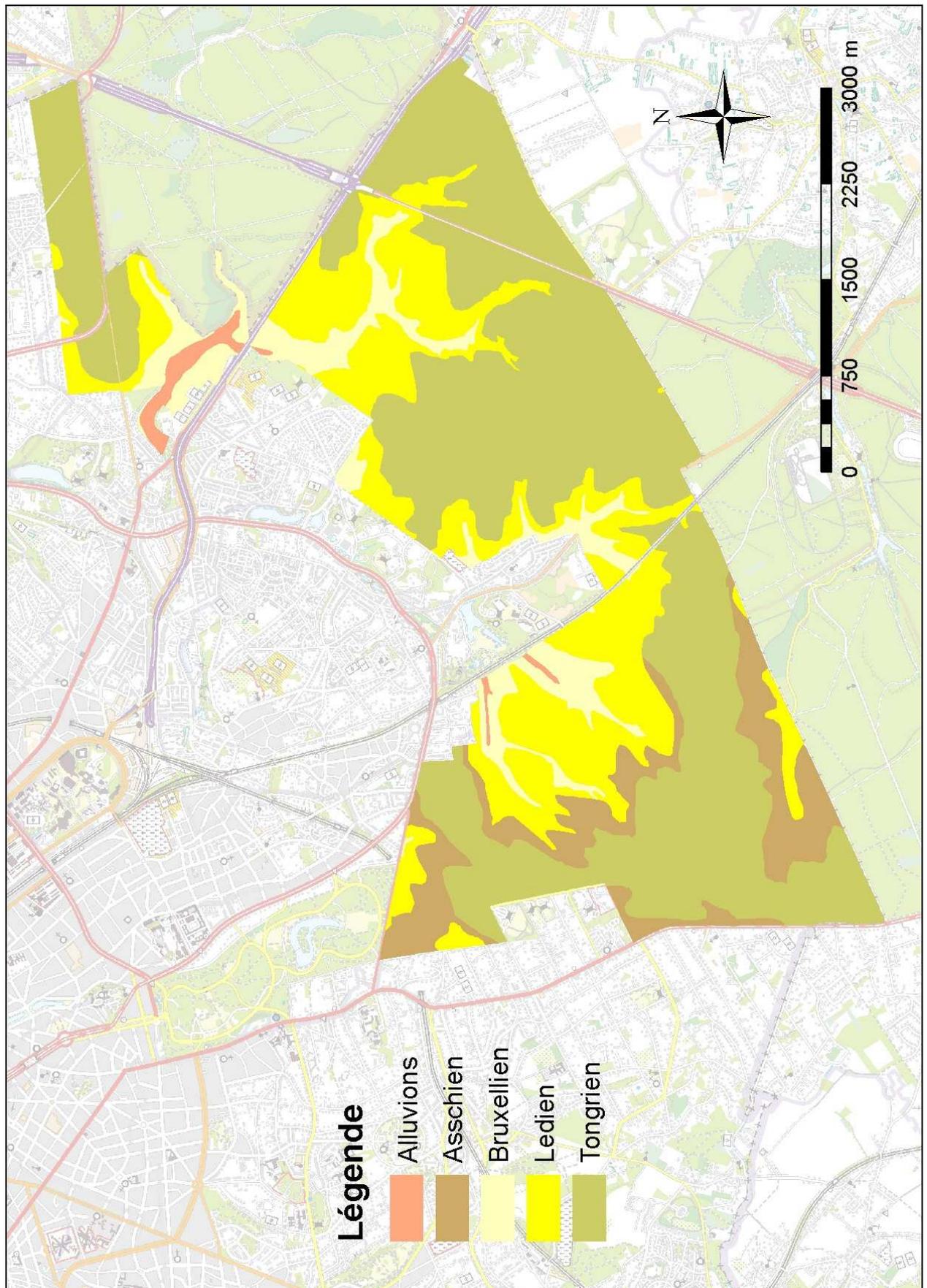


Figure 30 - Cartographie des étages géologiques présents sur la forêt de Soignes (les teintes jaunes représentent les assises à dominance sableuse).

Tableau 15 - Surfaces respectives des différentes géologies présentes sur la zone d'étude.

Assise géologique	% occupation
Alluvions	1
Tongrien	55
Asschien	10
Ledien	25
Bruxellien	8

6.2.4. Pédologie

Durant le Quaternaire, quatre générations de limon se sont juxtaposées aux couches géologiques présentes, sur un relief déjà formé. Une prospection à la tarière pédologique révèle à l'observateur les deux dernières générations de ces limons. Les phénomènes d'érosion rendent les sables plus ou moins affleurants. De plus, les apports tels que les alluvions et colluvions (plus récents) peuvent se mélanger dans une certaine mesure avec ces sables et deviennent à leur tour matériaux parentaux. L'ensemble présente une palette très diversifiée de sols (Figure 31 et Tableau 16): limoneux, limono-sableux, sablo-limoneux, sableux, etc. Ces derniers se rencontrent également avec présence d'un substrat sableux sous-jacent (moins de 120 centimètres de profondeur) ou non. Les argiles sont présentes dans une moindre mesure, mais dans des proportions non négligeables.

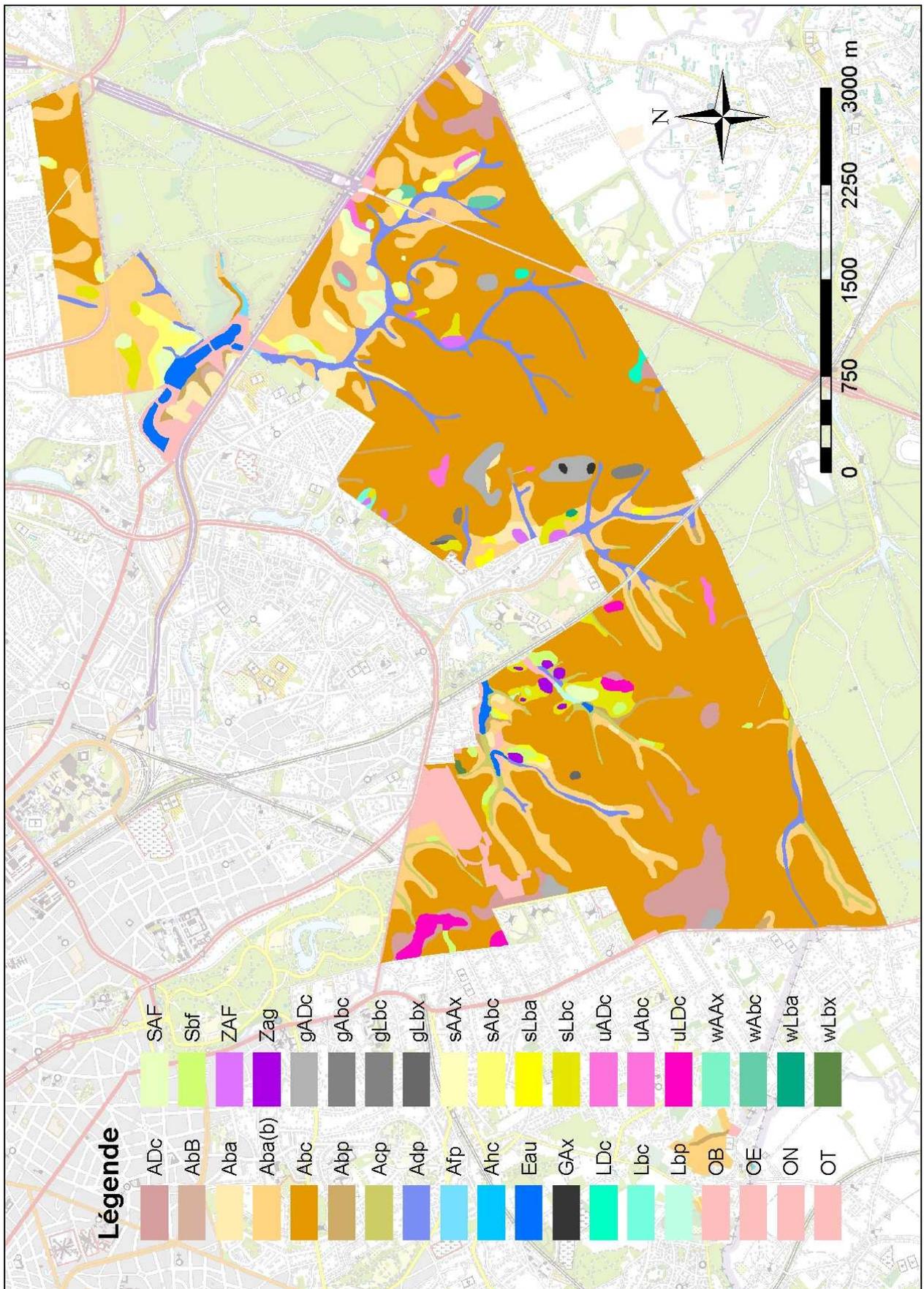


Figure 31 - Carte numérique des sols présents sur la zone d'étude.

Tableau 16 - Surfaces respectives des différents sols présents sur la zone d'étude

Sol	Aire (ha)	Sol	Aire (ha)
Aba	16.9	OE	0.8
Aba(b)	239.0	ON	3.0
AbB	1.0	OT	39.9
Abc	1062.5	sAAx	4.2
Abp	10.5	sAbc	15.2
Acp	18.7	SAF	21.1
ADc	57.4	Sbf	7.6
Adp	62.3	sLba	4.0
Afp	1.5	sLbc	24.1
Ahc	0.0	uAbc	2.0
Eau	18.4	uADc	5.4
gAbc	2.2	uLDc	11.6
gADc	18.9	wAAx	0.6
GAx	0.9	wAbc	3.0
gLbc	1.4	wLba	0.4
gLbx	0.8	wLbx	0.6
Lbc	1.0	ZAF	4.6
Lbp	1.1	Zag	3.6
LDc	2.4	(vide)	60.2
OB	6.1	Total	1735.0

Malgré la diversité des sols rencontrés, la majorité des sols soniens (85% en surface) est donc de type limoneux non gleyifié. Ces limons acides devraient être favorables à une large gamme d'essences forestières. Cependant, la présence à faible profondeur d'un horizon induré (*Fragipan*) limite le développement des racines et rend les arbres plus sensibles au vent. Des explications plus détaillées sur le *Fragipan* sont disponibles à l'annexe 1. La présence de cet horizon signifie que la majorité du système racinaire des arbres se concentre sur les premiers centimètres du sol qui sont dès lors surexploités. La productivité de la forêt de Soignes dépend dès lors des quelques racines qui ont traversé les veines de sols plus meubles présentes dans ce *Fragipan* et ont accès au loess carbonaté originel, très fertile. Ces veines sont appelées glosses.

Ces sols soniens supportent une litière épaisse et stratifiée donnant lieu à un humus de type *moder* de faible épaisseur. L'activité de la pédofaune et pédoflore y est limitée. Le turn-over de la majorité des peuplements y est donc de mauvaise qualité. Cette situation est expliquée par plusieurs paramètres :

- La fane du hêtre a une décomposition naturellement lente.
- La partie supérieure des loess soniens est acide par un processus de décalcification naturelle des limons de surface. Cette acidité est peu favorable au turn-over.
- La présence du *Fragipan* limite les apports nutritifs qui pourraient provenir de la roche-mère et accentue les phénomènes d'acidification en surface.
- La gestion sylvicole, par des peuplements serrés et une absence d'essences améliorantes, est également en partie responsable.

A cette faible qualité de surface s'ajoute à la sensibilité des sols au tassement des couches superficielles dû à l'exploitation forestière. Par endroit, un *microgley* discontinu se traduit par

la localisation hétérogène de taches de végétation et/ou de régénération naturelle. Cette couche se diagnostique le plus souvent au niveau de l'horizon Ah, avec présence d'une teinte grise tachetée de rouille (traces d'oxydo-réduction du Fer).

6.2.5. Végétation

Une carte de végétation a été dressée par l'ULB (***, ***) selon une classification propre et physionomique (Figure 32). Il en ressort que le contexte général de la forêt de Soignes, identifié à partir des végétations bien développées (c'est-à-dire des végétations feuillues à sous-bois herbacé) relève de différentes hêtraies acidophiles à acidocline : hêtraies à millet, fougères et ronces, hêtraie à fougères (relevant du *Milio-Fagetum* selon la classification de Noirfalise, 1984), hêtraies à canche flexueuse, à myrtille, à grande luzule (relevant probablement du *Fago-Quercetum* et du *Quercu-Betuletum*). Quelques hêtraies plus riches (à jacinthe, calcicole) sont renseignées localement, de même que quelques frênaies à carex (*Carici-Fraxinetum*) le long des sources et ruisseaux, etc.

Excepté ces situations locales, il s'agit donc d'un contexte acidophile à acidocline.

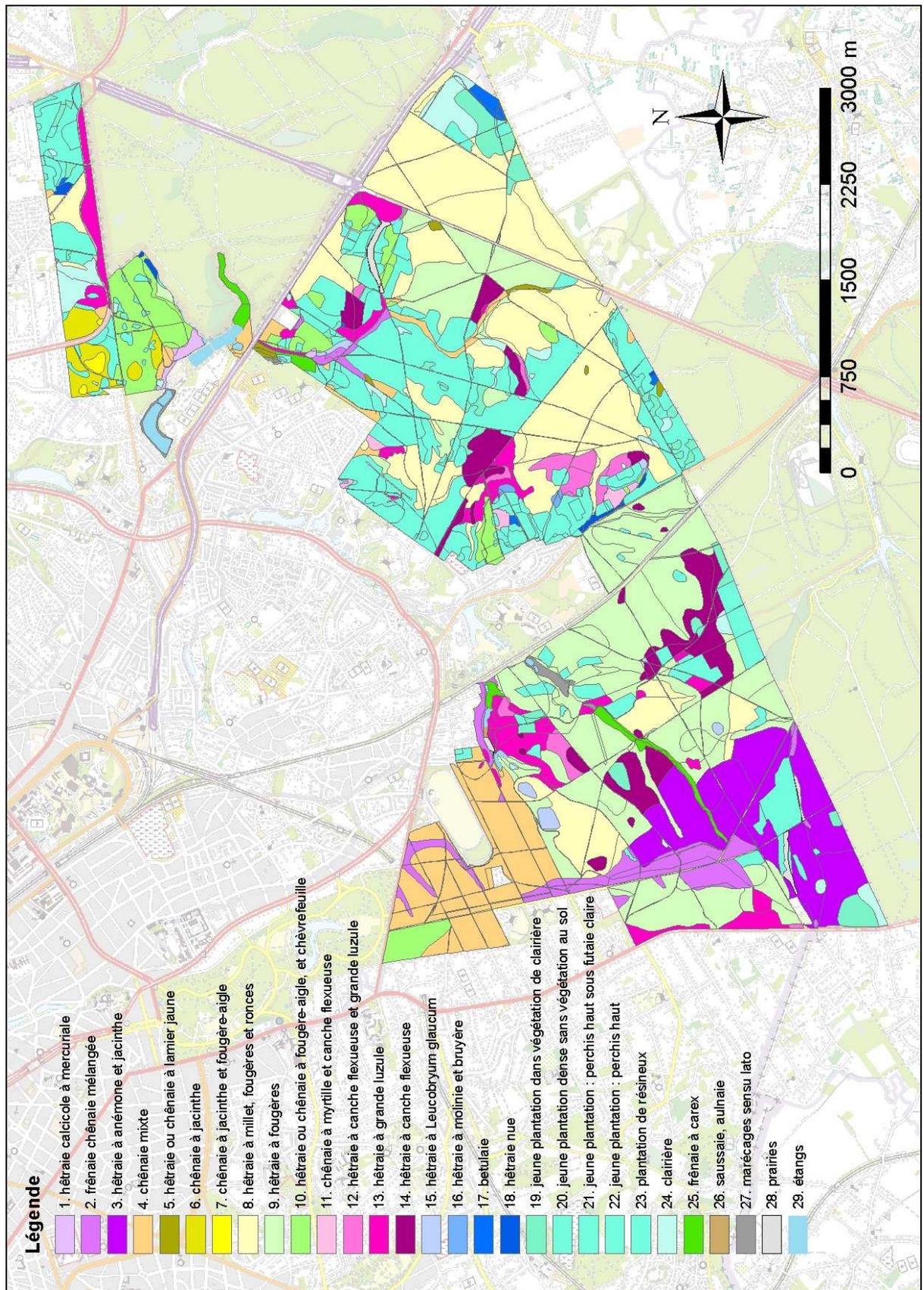


Figure 32 - Carte de végétation de la forêt de Soignes (ULB, **, ***)

Chapitre 7. Méthodologie

7.1. Méthodologie générale

Les parties méthodologie et résultats ont été ventilées par campagnes de mesures. En effet, plusieurs campagnes distinctes ont été réalisées soit avec des objectifs spécifiques, soit dans la volonté de grossir le jeu de données pour une analyse bien précise. La Figure 33 reprend de manière simplifiée le cheminement et les liens entre données disponibles sous le Système d'Informations Géographiques, les mesures effectuées sur un échantillon in situ et l'analyse de données qui en découle.

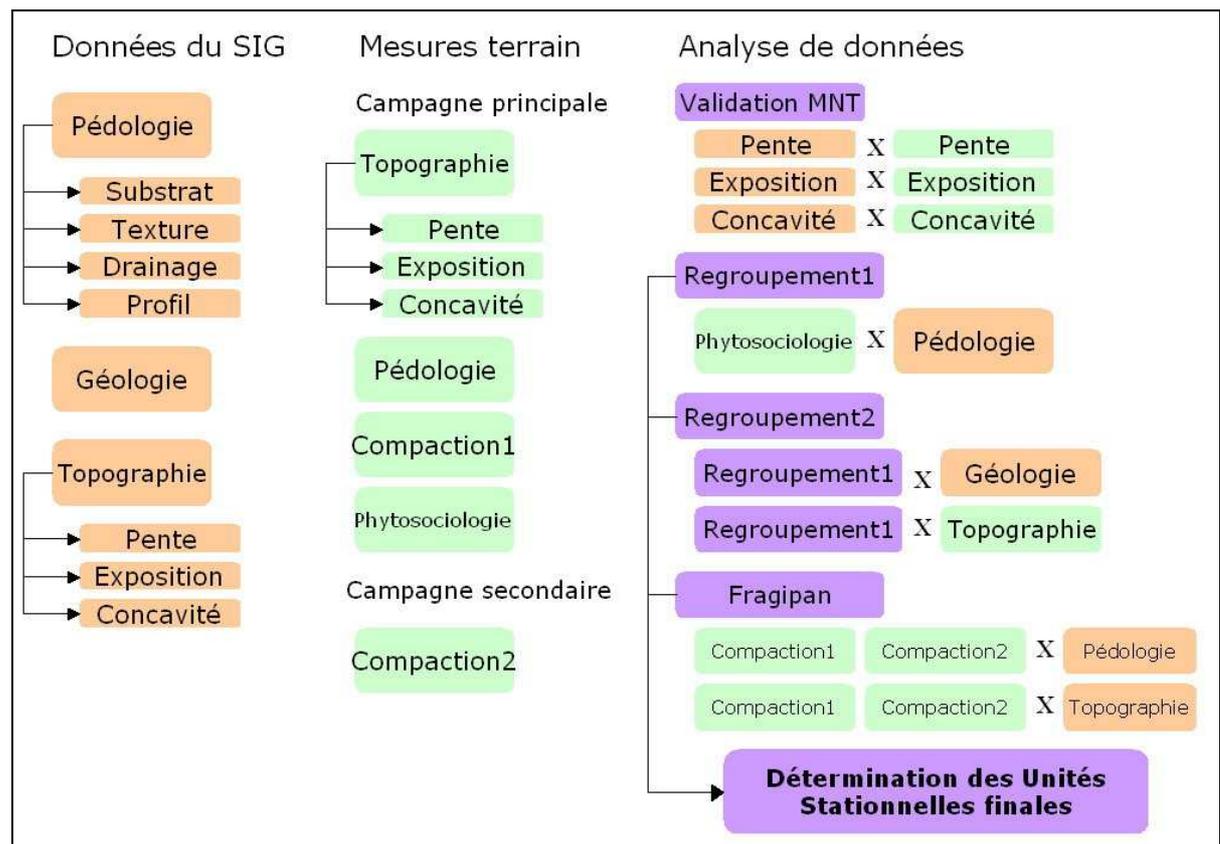


Figure 33 - Schéma simplifié des analyses effectuées en vue de la détermination d'Unités Stationnelles représentatives de la zone d'étude.

7.2. Prétraitement au bureau

En vue de caractériser le plus finement les Unités Stationnelles (US) présentes sur la zone d'étude, une phase bureau est nécessaire avant toute mise œuvre d'une campagne de mesures terrain. Cette phase bureau se décompose comme suit :

- Familiarisation avec la zone d'étude
- Exploitation de l'information déjà disponible
- Détermination des variables stationnelles à prendre en compte pour définir les US
- Proposition d'un regroupement sur base de l'information disponible
- Mise en place d'une procédure de validation sur le terrain

7.2.1. Familiarisation avec la zone d'étude

Il est important d'avoir une bonne vue d'ensemble de la topographie, la géologie, la pédologie et la végétation de la zone d'étude pour orienter l'étude vers les variables stationnelles les plus significatives. Quelques visites ont été programmées en ce sens. Elles ont été orientées en fonction des particularités de la zone d'étude, quelques exemples : type de sol particulier, phénomènes de compaction, végétation atypique, etc. Ces visites ont également servi à prendre l'avis d'expert ou du gestionnaire de terrain sur ces questions. Exemple : sortie « *Fragipan* » avec le Professeur Laurent Bock et plusieurs collaborateurs de la carte numérique des sols.

7.2.2. Exploitation de l'information déjà disponible

7.2.2.1. *Cartographie de base*

La forêt de Soignes est une forêt particulièrement bien étudiée, de telle sorte que les couches cartographiques disponibles pour établir un SIG sont nombreuses (Tableau 17).

Tableau 17 - Listing des couches cartographiques brutes disponibles sur la zone d'étude

Couche cartographique utilisée	Editeur de la couche ou source
IGN 1 / 50.000	I.G.N.
Carte numérique des sols	IBGE
Carte géologique	IBGE
Modèle Numérique de Terrain (précision: 10m)	IBGE
Carte des sources et ruisseaux	IBGE
Carte des étangs et marais	IBGE
Carte des routes et sentiers	IBGE
Limites des triages	IBGE
Carte des associations phytosociologiques	IBGE
Carte d'évaluation biologique	INBO
Grille de l'inventaire forestier permanent	FUSAGX
Parcellaire forestier	IBGE
Carte de fréquentation du public	IBGE

7.2.2.2. *Cartographie transformée*

La couche Modèle Numérique de Terrain représente une source d'informations toute particulière. Chaque pixel de 10 mètres de côté possède une information d'altitude. Par traitements mathématiques et algorithmiques, le logiciel ArcGis peut estimer tout un ensemble de paramètres et recréer ainsi une couche exprimant cette nouvelle information. Le Tableau 18 reprend le listing des couches intermédiaires ainsi obtenues, ainsi que la fonction utilisée dans le logiciel. Le détail des calculs d'estimations des différentes variables ne sera pas abordé ici.

Tableau 18 - Couches intermédiaires issues de la transformation du Modèle Numérique de terrain

<p><i>La pente :</i></p>	<p>La pente pour chaque pixel est obtenue par la fonction <i>Slope</i> (chemin : <i>ArcToolbox/3D Analyst Tools/Raster Surface</i>). Cette pente, exprimée en degré peut être ventilée en catégorie par la fonction <i>Reclassify</i> (chemin : <i>ArcToolbox/3D Analyst Tools/Raster Reclass</i>). Exemples de classification (Vast 2002) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • $< 6^\circ$ OU $\geq 6^\circ$ (comportement hydrique) • $< 12^\circ$ OU $\geq 12^\circ$ (définition sous-secteur en prenant en compte l'exposition) • $< 6^\circ$ OU $[6,12[$ OU $\geq 12^\circ$ (alliant les deux)
<p><i>L'exposition :</i></p>	<p>L'exposition peut être déterminée pour chaque pixel par la fonction <i>Aspect</i> (chemin : <i>ArcToolbox/3D Analyst Tools/Raster Surface</i>). Cette exposition, exprimée en degré (0° correspond au Nord), peut également être ventilée par la fonction <i>Reclassify</i>, par exemple en exposition chaude ou froide (Delvaux et Galoux 1962) (Figure 34) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exposition froide : de 0° à 113° OU de 292° à 360° • Exposition chaude : de 113° à 292°
<p><i>La concavité :</i></p>	<p>L'expression de la concavité est calculée à partir de la fonction <i>Curvature</i> (chemin : <i>ArcToolbox/3D Analyst Tools/Raster Surface</i>). Le signe négatif du résultat exprime le caractère concave du pixel, plus le chiffre s'éloignera de 0, plus fort sera le caractère concave. Le signe positif du résultat exprime le caractère convexe du pixel, plus le chiffre s'éloignera de 0, plus fort sera le caractère convexe. Le zéro exprime une situation de pleine pente parfaite ou d'un plat parfait. Cette dernière situation, selon la précision du MNT reste marginale.</p>
<p><i>L'ombrage :</i></p>	<p>Une valeur d'ombrage peut être obtenue à partir de la fonction <i>Hillshade</i> (chemin : <i>ArcToolbox/3D Analyst Tools/Raster Surface</i>). Cette valeur exprime l'insolation reçue pour chaque pixel en fonction du relief voisin. Plus cette valeur est élevée, plus le pixel est exposé au rayonnement solaire.</p>

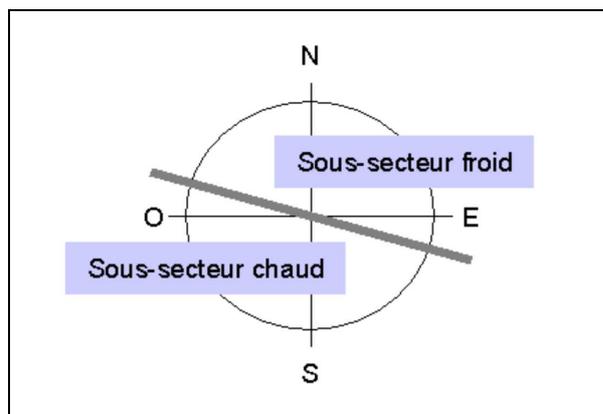


Figure 34 - Illustration des expositions froides et chaudes selon Delvaux et Galoux 1962

L'exposition, en combinaison avec la pente nous indiquent les sous-secteurs chauds et sous-secteurs froids. Le sous-secteur chaud sera représenté par une pente supérieure à 12° et une

exposition chaude (identifiée dans la figure 35). Le sous-secteur froid sera également représenté par une pente supérieure à 12°C, mais par une exposition froide.

Dans le cas d'une reclassification d'un Raster (image composée de pixels), une série de pixels isolés par leur classe d'attribution (exemple Figure 35) peuvent apparaître selon le type de MNT. A l'échelle d'un ou de quelques pixels (1 pixel est égal à un carré de 10m sur 10m dans ce cas-ci), ces îlots isolés n'ont pas lieu d'être et un lissage est nécessaire. Une telle opération a été réalisée pour la création d'une couche concave/convexe (à partir de la couche intermédiaire exprimant la concavité) et il est possible de procéder de deux manières :

- Réalisé dans ce cas-ci, un traitement d'itération (commande *MapIter*) dans le logiciel Ilwis permet de réduire ces artefacts isolés. Une répétition d'au minimum 5 fois de cette commande est recommandée. La Figure 35 illustre le résultat de ces itérations.
- Une lissage peut également être réalisé sous le logiciel Arcgis au moyen des outils *Majority Filter* (effectuer 5 fois de suite) et *Boundary clean* (une seule fois à la fin).

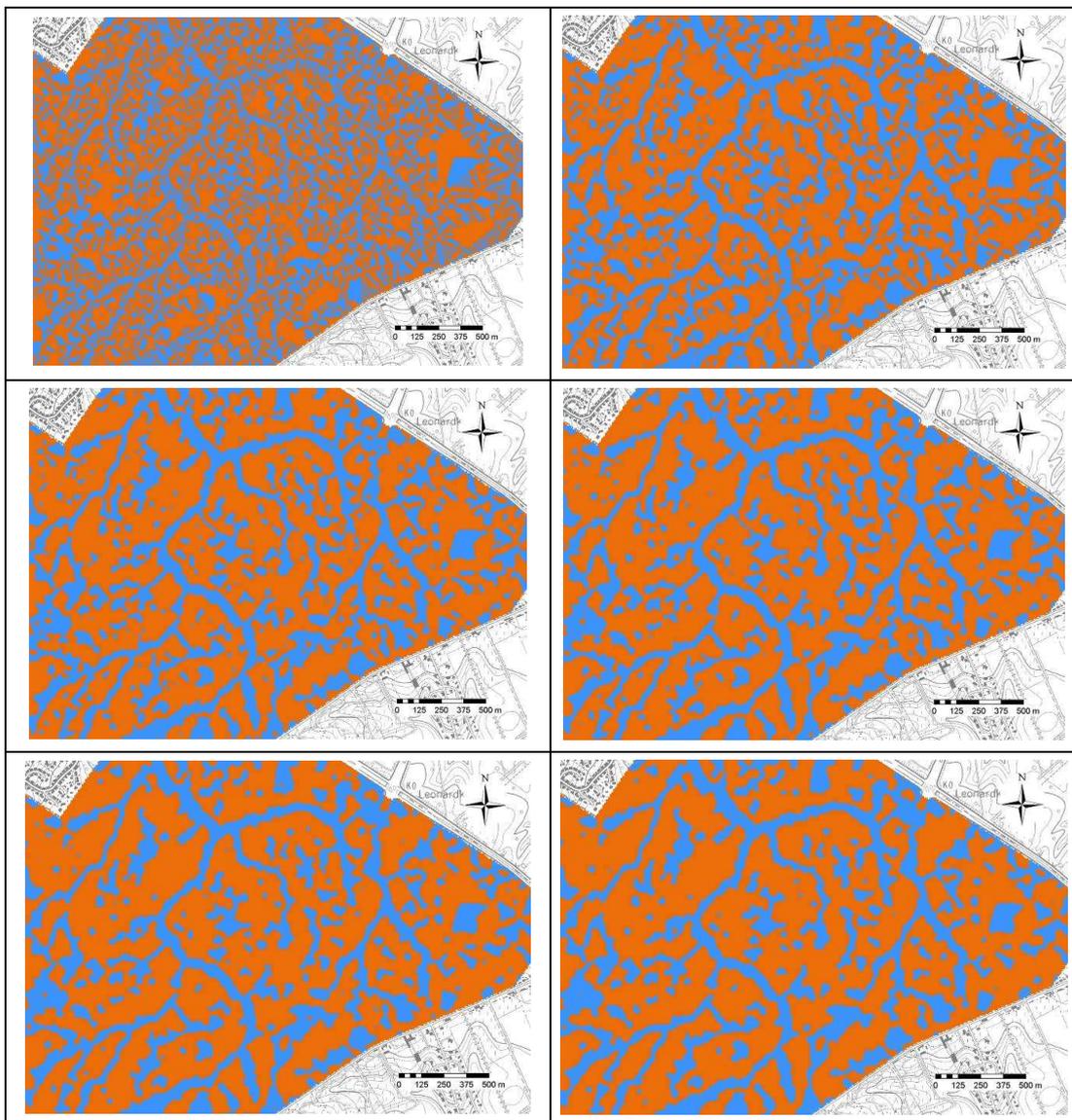


Figure 35 – Carte de concavité du relief : illustration du lissage effectué sous Ilwis, résultats des 5 répétitions de la commande *MapIter*. En orange les zones convexes, en bleu les zones concaves.

7.2.2.3. Couches phytosociologiques

Si de telles couches existent, elles peuvent fournir une information précieuse dans l'optique d'effectuer d'éventuels regroupements stationnels avant une phase terrain. Deux cartes sont ainsi disponibles au niveau de la zone d'étude :

- La carte d'évaluation biologique réalisée par l'INBO (Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek) indique l'association phytosociologique présente ou, dans les milieux anthropiques, l'occupation du sol. La liste des unités cartographiées fait l'objet du Tableau 19.
- La carte de végétation (ULB) reprend jusqu'aux sous-associations présentes au niveau des parcelles. La liste des unités cartographiées fait l'objet du Tableau 19.

Tableau 19 - Listes des données disponibles pour la carte d'évaluation biologique et la carte des associations phytosociologiques.

Carte des associations phytosociologiques (ULB)	Carte d'évaluation biologique (INBO)
hêtraie à molinie et bruyère	Fago-Quercetum
hêtraie à Leucobryum glaucum	Milio-Fagetum
hêtraie à canche flexueuse	Endymio-Fagetum
hêtraie à canche flexueuse et grande luzule	Stellario-Carpinetum
hêtraie à grande luzule	Endymio-Carpinetum
hêtraie à fougères	Querco-Betuletum
hêtraie nue	Ulmo-Fraxinetum
hêtraie ou chênaie à fougère-aigle, et chèvrefeuille	Carici-Fraxinetum et Cardamino-Alnetum
hêtraie à millet, fougères et ronces	Macrophorbio-Alnetum
hêtraie à anémone et jacinthe	Marécage (Magnocaricion)
hêtraie ou chênaie à lamier jaune	Roselière (Phragmition)
hêtraie calcicole à mercuriale	Peupleraie
chênaie à jacinthe	Pinus nigra
chênaie à jacinthe et fougère-aigle	Pinus nigra avec sous-étage
chênaie mixte	Pinus nigra sans sous-étage
chênaie à myrtille et canche flexueuse	Peuplement à graines
betulaie	Végétation à moitié ouverte
frênaie chênaie mélangée	Végétation buissonnante
frênaie à carex	Rangée d'arbres
saussaie, aulnaie	Résineux sur berge
marécages sensu lato	Parc
jeune plantation	Ornemental
plantation de résineux (surcharge pour l'espèce)	Lande
clairière	Prairies
prairies	Champs sur sol limoneux
étangs	plan d'eau eutrophe
(vide)	Milieu urbanisé

En croisant ces informations spatiales avec la carte numérique des sols, il est possible d'analyser la répartition des associations ou des unités de végétation par type de sol. Les différents tableaux de contingence croisant ces données sont consultables à l'annexe 3. Les surfaces des différents types de sols sont très inégales. En effet, deux types de sols (Abc et

Aba(b)) dominant la zone d'étude et de nombreux sols occupent une surface inférieure à 5 ha. Dans ces tableaux, seuls les types de sols les plus représentés ont été pris en compte, ainsi que les données de végétation susceptibles de renseigner un ordre d'idée sur les niveaux hydriques et trophiques. Vu la grande hétérogénéité dans les surfaces en jeu, aucune affirmation ne peut être avancée, mais deux constats sont à souligner :

- Au sein même d'un type de sol (ex : Aba(b)), on peut observer des associations phytosociologiques relativement différenciées (pour Aba(b) : Fago-Quercetum, Stellario-Carpinetum, Endymio-Fagetum) .
- Quelques tendances semblent cependant ressortir, elles seront à confirmer dans la suite de l'étude :
 - le caractère indicateur de Aba(b) semble moins acide et plus riche que celui du sol Abc ;
 - les sols sans développement de profil (Abp, Acp, Adp) semblent « accueillir » le même type de végétation (Stellario-Carpinetum, Carici-Fraxinetum) ;
 - les sols à drainage D (Adc, gADc, uLDc) semblent « accueillir » le même type de végétation (Stellario-Carpinetum, Milio-Fagetum) ;
 - les sols à couche sous-jacente sableuse et texture limoneuse (sAbc, sLbc) semblent « accueillir » le même type de végétation (Fago-Quercetum);
 - les sols à texture essentiellement sableuse (ZAF, Zag) semblent « accueillir » le même type de végétation (Fago-Quercetum).

7.2.3. Détermination des variables à prendre en compte

La partie bureau avant validation terrain peut aboutir à un regroupement des types de sols, combinés éventuellement à la topographie pour former des unités géomorpho-pédologiques. Théoriquement, les conditions du milieu étant déterminantes dans la formation de la végétation, ces unités géomorphopédologiques devraient correspondre à des unités de végétation potentielle. Ces regroupements doivent ensuite être soumis à une validation terrain.

Dans le cas présent, plusieurs interrogations subsistent quant à l'influence de certains types de sols sur la végétation : influence des couches sous-jacentes (sableuse, argileuse, argilo-sableuse, caillouteuse), influence du drainage D, influence du *Fragipan* (non cartographié dans la carte des sols). Ce dernier facteur fait l'objet d'une attention toute particulière vu sa grande influence d'un point de vue sylvicole. Une partie, consultable en annexe, lui est dédiée, afin de mieux fixer les idées sur ce phénomène (annexe 2). En conséquence de ces interrogations, une validation sur base d'un regroupement effectué en phase bureau nous semble hasardeuse. La démarche entreprise ici sera préférentiellement de caractériser les différentes variables susceptibles de jouer un « rôle stationnel ». En croisant ensuite ces variables entre elles, un échantillonnage terrain peut être entrepris.

Par leur importance d'un point de vue stationnel ou par la facilité d'une cartographie de ceux-ci, les paramètres suivants sont à prendre en compte :

- Pédologie : texture, drainage, développement de profil, éventuel substrat sous-jacent.
 - Tous les types de sols
- Topographie :
 - Pente
 - Exposition
 - Concavité
- Autres :
 - Géologie (éventuelle influence d'une nappe perchée)
 - *Fragipan* (à déterminer, non cartographié)

Le relief en jeu rend le facteur insolation plus secondaire, d'autant qu'il y a moyen de l'exprimer dans la notion de sous-secteur, en combinant pente et exposition. L'échantillonnage opéré en vue d'une campagne de mesure est décrit à la section 7.2.5.

7.2.4. Proposition d'un regroupement sur base de l'information disponible

Comme souligné dans la section précédente et vu la complexité de la zone d'étude, une validation sur base d'un regroupement préalable ne sera pas retenue. L'échantillonnage prendra en compte l'ensemble des variables retenues comme pertinentes.

7.2.5. Mise en place d'une procédure de validation sur le terrain

Dans une certaine mesure, la pédologie exprime la topographie, si bien que pour un certain nombre de sols, un échantillonnage différentiel par les variables topographiques n'est pas réalisable. Pour les autres sols où cela était possible, une stratification par les variables topographiques a été appliquée. Le Tableau 20 reprend en détail la stratification de l'échantillonnage. La Figure 36 illustre la procédure de sélection des zones d'intérêt. Dans la mesure du possible, le choix et la disposition des unités d'échantillonnage ont été orientés pour matérialiser un transect sur le terrain. De même, les points de l'inventaire forestier permanent se situant dans des zones d'intérêt ont été sélectionnés préférentiellement. La Figure 37 reprend l'ensemble des unités d'échantillonnage sur la zone d'étude.

Tableau 20 - Détail des unités d'échantillonnage en croisant les différents sols et les variables topographiques

	Pente < 12°						Som	Pente > 12°C						Som	Som
	Concave		Som	Convexe		Som		Concave		Som	Convexe		Som		
	Froid	Chaud		Froid	Chaud			Froid	Chaud		Froid	Chaud			
Aba		2	2	1	1	2	4	1		1	2	2	3	7	
Aba(b)	3	5	8	3	4	7	15	2	2	4	2	2	4	8	23
Abc	3	2	5	5		5	10	4	4	8	3	3	6	14	24
Abp	2		2		2	2	4		1	1				1	5
Acp	1	6	7				7				1	1	1	1	8
ADc	2		2	1	4	5	7								7
Adp	2	1	3	1	1	2	5	1	1	2	1	1	2	4	9
Afp		1	1				1								1
gAbc					1	1	1								1
gADc		2	2		2	2	4								4
GAX					1	1	1				1	1	1	1	2
gLbc					1	1	1								1
gLbx				1	1	2	2								2
Lbc					2	2	2								2
Lbp	1		1				1								1
Lca									1	1				1	1
LDc		1	1		1	1	2								2
Ldp								1		1				1	1
sAAx					3	3	3								3
sAba		1	1				1								1
sAbc					3	3	3				1	1	1	1	4
SAF	1	4	5		3	3	8				1	1	1	1	9
Sbf		2	2	1	1	2	4				1	1	1	1	5
sLba				2		2	2				2		2	2	4
sLbc		1	1	2	2	4	5	2		2			2	2	7
uAbc		1	1	1		1	2								2
uADc		1	1	1	2	3	4								4
uLDc				3	1	4	4								4
wAAx					1	1	1								1
wAbc					2	2	2								2
wLba				1		1	1								1
wLbx					1	1	1								1
ZAF				1	4	5	5								5
Zag				1		1	1		1	1		1	1	2	3
Zbx					1	1	1								1
Total	15	30	45	25	45	70	115	11	10	21	10	12	22	43	158

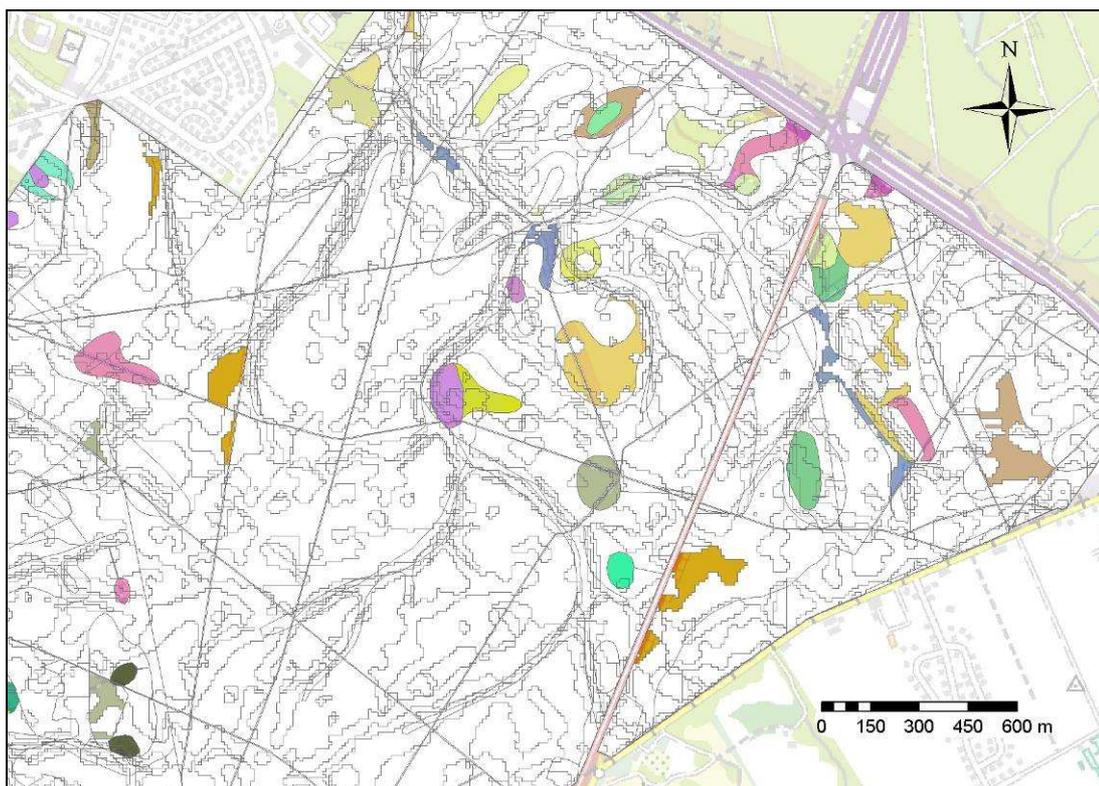


Figure 36 - Exemple de sélection de zones d'intérêt pour le choix d'unités d'échantillonnage

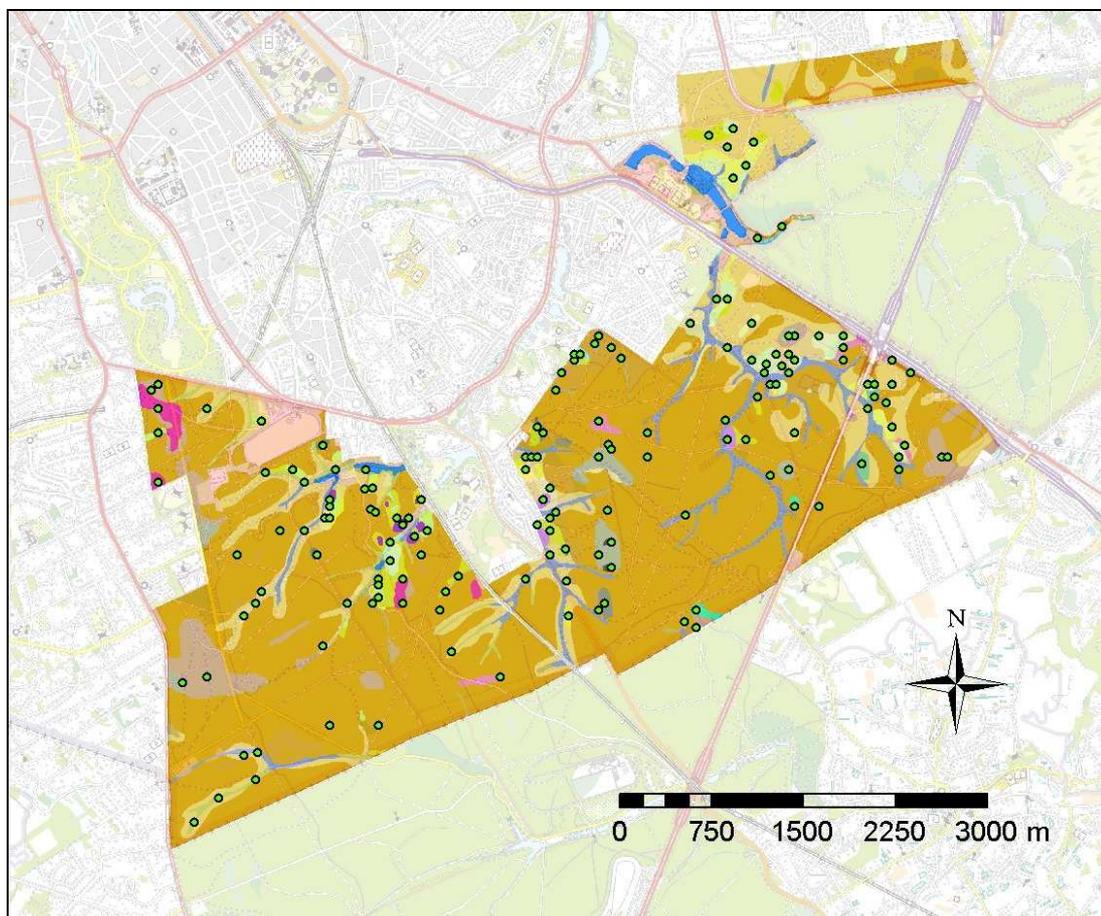


Figure 37 - Distribution spatiale de l'ensemble des unités d'échantillonnage.

L'hétérogénéité de la distribution des unités d'échantillonnage dans la stratification est due aux surfaces en jeu et à la distribution de ces surfaces au sein de la zone d'étude. Les coordonnées géographiques des unités retenues sont transférées dans un GPS. Le détail des mesures effectuées lors de la campagne de mesures est explicité dans la section suivante.

7.3. Campagne de mesure

7.3.1. Campagne principale

Trois catégories de mesures ont été réalisées sur chaque unité d'échantillonnage : mesures topographiques, pédologiques et phytosociologiques. Le détail de la méthode choisie et du matériel utilisé est développé pour chaque catégorie.

7.3.1.1. Topographie

7.3.1.1.1. Méthodologie

Plusieurs méthodes de mesures sont utilisées afin de caractériser la topographie d'un point (Bary-Lenger et al., 1995; Delvaux & Galoux, 1962; Lévy et al., 1992; Mac Nab, 1993; Monserud et al., 1990). Quelques unes sont reprises, à titre d'exemple, dans le Tableau 21. Le Tableau 22 reprend une typologie qualitative du relief.

Tableau 21 - Synthèse des mesures caractérisant la topographie d'un point (Claessens, 1999)

Auteurs	Variables écologiques mesurées
<i>Echelle du paysage (unités topographiques, plutôt en relation avec le bilan hydrique)</i>	
(Classique)	Description qualitative
Levy et al. [1992]	Description interprétative en fonction des mouvements d'eau
Mac Nab [1993]	Moyenne de 8 mesures d'angle vertical vers l'horizon
Monserud <i>et al.</i> [1990]	Distance à la rupture de pente (en % de la pente)
<i>Echelle de la station (exposition, plutôt en relation avec le bilan thermique et radiatif)</i>	
(Classique)	Pente et orientation
Bary et al. [1995]	Expopente : indice calculé à partir de la pente, de l'exposition et de la position topographique
Delvaux & Galoux [1962]	Pente et orientation traduits en 3 niveaux thermiques et radiatifs
Stage [1976]	Pente et orientation traduits en coefficient correcteur topographique sur la productivité

Tableau 22 - Typologie qualitative du relief à un point donné (Claessens, 1999)

<i>Forme de relief</i>
<i>Dépression géomorphologique</i>
<i>Vallée</i>
Plaine alluviale
Terrasse alluviale homogène
Bourrelet alluvial, berge, île
Dépression marginale
<i>Vallon</i>
<i>Versant</i>
A-pic, abrupt, falaise, ligne de crête
Haut de pente, pente convexe
Pleine pente
Replat, terrasse, pente concave
Bas de pente
<i>Plateau</i>
Plateau étendu, plane
Dôme, sommet, rebord (légère pente)
Cuvette, dépression du plateau

Dans la présente étude, trois méthodes ont été retenues afin de les comparer entre elles (fiche terrain à la Figure 38) :

- Mesures de pentes : quatre mesures de pente sont effectuées en croix centrée sur l'unité d'échantillonnage. Une des perpendiculaires de cette croix est orientée dans la direction de la pente. Lors de la première mesure, un azimut est également noté afin d'en déduire l'exposition. Les mesures de pentes s'effectuent d'un point situé à 20 mètres du centre de l'unité d'échantillonnage, vers ce centre. La distance de 20 mètres a été choisie arbitrairement afin de gommer l'éventuel effet d'un micro-relief, tout en restant à l'échelle d'une station forestière.
- Mesures d'horizons : huit mesures d'horizon à intervalles d'angles réguliers (45°) sont effectuées en commençant par le sens de la pente (Mac Nab, 1993). Par horizon, il est entendu la ligne au niveau du sol, et non la ligne suivant les cimes des arbres. En situation convexe en bordure de vallée, l'horizon ne correspondra pas au sommet du versant opposé, mais bien à la ligne représentant le « lit » de la vallée (Figure 39). En fonds de vallée et situation concave, l'horizon du sommet opposé prévaudra.
- Estimation qualitative : une estimation qualitative tel qu'illustrée au Tableau 22 est également notée.

Topographie:		Pente forte 1*: <input type="text"/>	Pente perp. 1*: <input type="text"/>
Relief:		Azimut 1: <input type="text"/>	Azimut 1: <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Fonds de vallée		Pente forte 2*: <input type="text"/>	Pente perp. 2*: <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> A-pic, abrupt, falaise, ligne de crête		* mesuré à 20 m du centre	
<input type="checkbox"/> Haut de pente, pente convexe		Azimut: <input type="text"/>	
<input type="checkbox"/> Pleine pente		Azimut: <input type="text"/>	+180°: <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Replat, terrasse, pente concave		+45°: <input type="text"/>	+225°: <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Bas de pente		+90°: <input type="text"/>	+270°: <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Plateau étendu, plane		+135°: <input type="text"/>	+315°: <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Dôme, sommet, rebord (légère pente)			
<input type="checkbox"/> Cuvette, dépression du plateau			

Figure 38 - Extrait de la fiche de mesures concernant le volet topographie

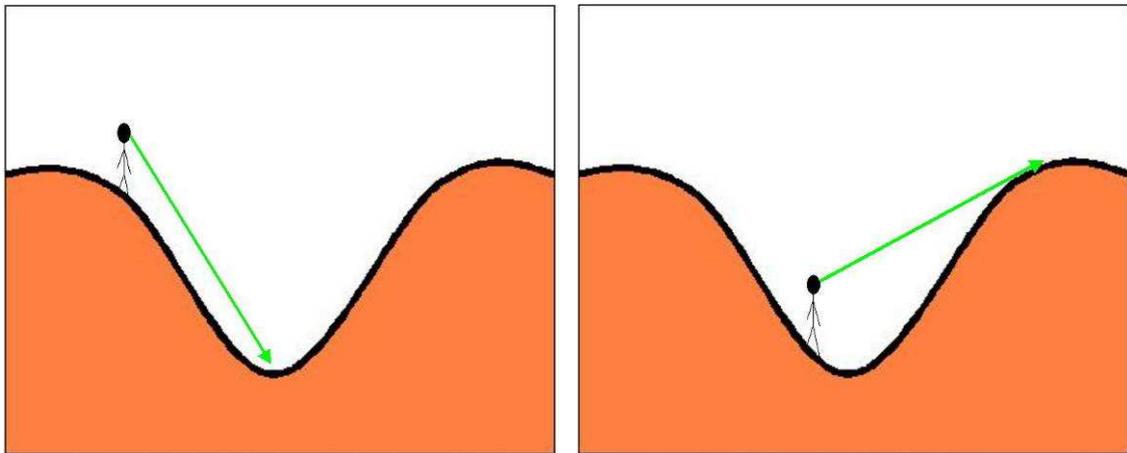


Figure 39 - Illustration des deux cas de figure de mesure de l'horizon avec la présence d'un versant opposé. A gauche, quand l'opérateur se situe en zone convexe, à droite quand il se situe en fonds de vallée ou zone concave.

7.3.1.1.2. Matériel

Le matériel suivant est nécessaire pour les mesures des variables topographiques :

- boussole ;
- vertex, pour le calcul d'angles et de distances ;
- mire, pour le calcul de distances avec le vertex ;

7.3.1.2. Pédologie

7.3.1.2.1. Méthodologie

Cette partie comporte deux objectifs :

Le premier consiste en une validation locale de ce que nous renseigne le polygone de la carte numérique des sols et reprend les informations suivantes : humus, texture, traces d'hydromorphie et profondeur de ces traces, éventuel substrat sous-jacent et profondeur d'apparition de celui-ci (Figure 40).

Pédologie:		
Humus:	<input type="text"/>	Texture: <input type="text"/>
		Sigle: <input type="text"/>
Hydromorphie:	<input type="text"/>	Profondeur: <input type="text"/>
Fragipan:	<input type="text"/>	Autre: <input type="text"/>
		Prof. Sondage: <input type="text"/>
Prof1:	<input type="text"/>	<i>Prof1 = Profondeur d'apparition de la couche compactée (cm)</i> <i>N1 = Force déployée pour "traverser cette couche" (N)</i> <i>Delta = N1 - la force déployée avant de rencontrer la couche compactée (N)</i> <i>Prof2 = profondeur finale du sondage (cm)</i> <i>N2 = force déployée à cette profondeur (N)</i>
N1:	<input type="text"/>	
Delta:	<input type="text"/>	
Prof2:	<input type="text"/>	
N2:	<input type="text"/>	

Figure 40 - Extrait de la fiche de mesures concernant le volet pédologie

Le deuxième objectif est quantifier les phénomènes de compaction présents sur l'unité d'échantillonnage. Dans cette optique, un pénétromètre a été utilisé (Figure 41). Ce pénétromètre est composé d'un manomètre, d'une tige et d'un cône de pénétration (section fixée à 1 cm² dans cette étude, cône ayant la plus petite surface disponible). Le manomètre exprime la force exercée pour enfoncer le cône et la tige dans le sol. Une aiguille du manomètre reste mobile en fonction de la force appliquée (aiguille noire). Une autre aiguille, mise en mouvement par la première, indique la force maximum déployée sur la mesure (aiguille rouge). Plus de détails sur les différentes méthodes pour quantifier la compaction d'un sol sont consultables à l'annexe 1.



Figure 41 - Pénétrömètre vendu par l'entreprise Eijkelkamp, composé d'un manomètre, de tiges et de cônes de sections différentes.

Les différentes mesures à noter lors de l'analyse pénétrométrique sont les suivantes (voir également Figure 40) :

- Prof1 : si une couche compactée est présente, la profondeur d'apparition de la couche compactée est notée en centimètres. S'il n'y a pas de couche compactée distincte des autres horizons, c'est la profondeur du sondage qui est noté (maximum 90 cm), la case Delta restant vide.
- N1 : la force déployée pour « traverser » cette couche, c'est-à-dire la force indiquée par le pénétromètre lorsque la couche compactée cède et que le complexe tige-cône s'enfonce à nouveau dans le sol. L'unité est le Newton.
- Delta : le delta représente le N1 auquel on soustrait la valeur de la force déployée avant de se « heurter » à la couche compactée. Ce delta s'exprime en Newton. S'il n'y

a pas de phénomène de compaction, ce delta n'a pas lieu d'être ainsi que les cases qui suivent.

- Prof2 : après la profondeur de l'éventuelle couche compactée, la profondeur du sondage ou d'un obstacle infranchissable est notée. L'unité reste le centimètre.
- N2 : représente la force déployée juste avant d'atteindre la profondeur finale du sondage. L'unité est le Newton.

Ces mesures ont été définies à partir de l'allure des courbes enregistrées par un pénétromètre électronique (voir section 7.3.2.2 page 235). Ces courbes représentent l'évolution de la pression exercée sur le pénétromètre par rapport à la profondeur. La Figure 42 illustre les différentes mesures prises avec un pénétromètre non électronique sur le graphe reprenant la courbe moyenne de 10 mesures effectuées avec un pénétromètre électronique sur une surface d'un mètre carré. On peut observer que le *Delta* n'est en réalité pas inféodé à une profondeur précise, mais s'effectue sur environ 15 cm. Cet effet est dû à ce que la courbe représentée est une moyenne de mesures de profondeur d'apparition de la couche compactée. La Figure 43 reprend le même principe, mais avec une seule mesure pénétrométrique. Le pallier s'apparente beaucoup plus à une verticale, l'apparition du *Fragipan* étant abrupte.

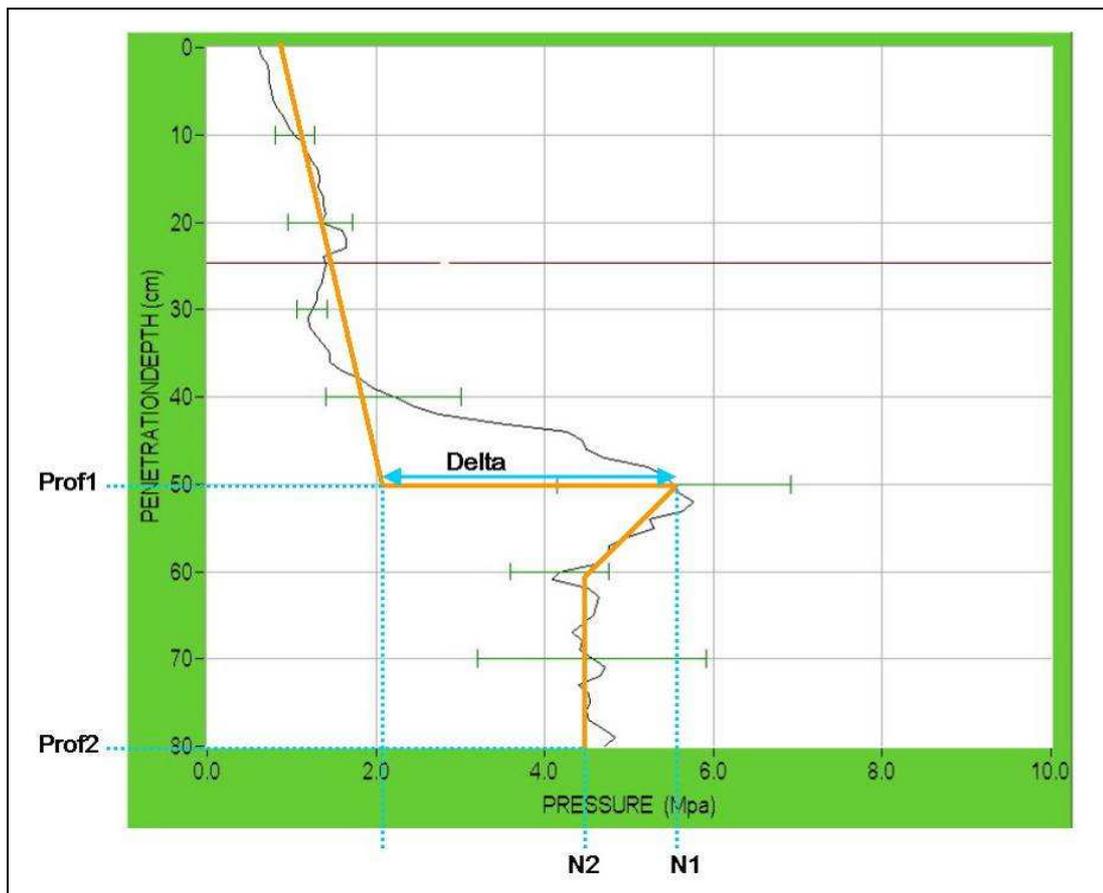


Figure 42 - Courbe moyenne (avec IC tous les 10 cm de profondeur) de 10 courbes mesurées avec le pénétromètre électronique. Les mesures définies pour la campagne de mesure sont illustrées.

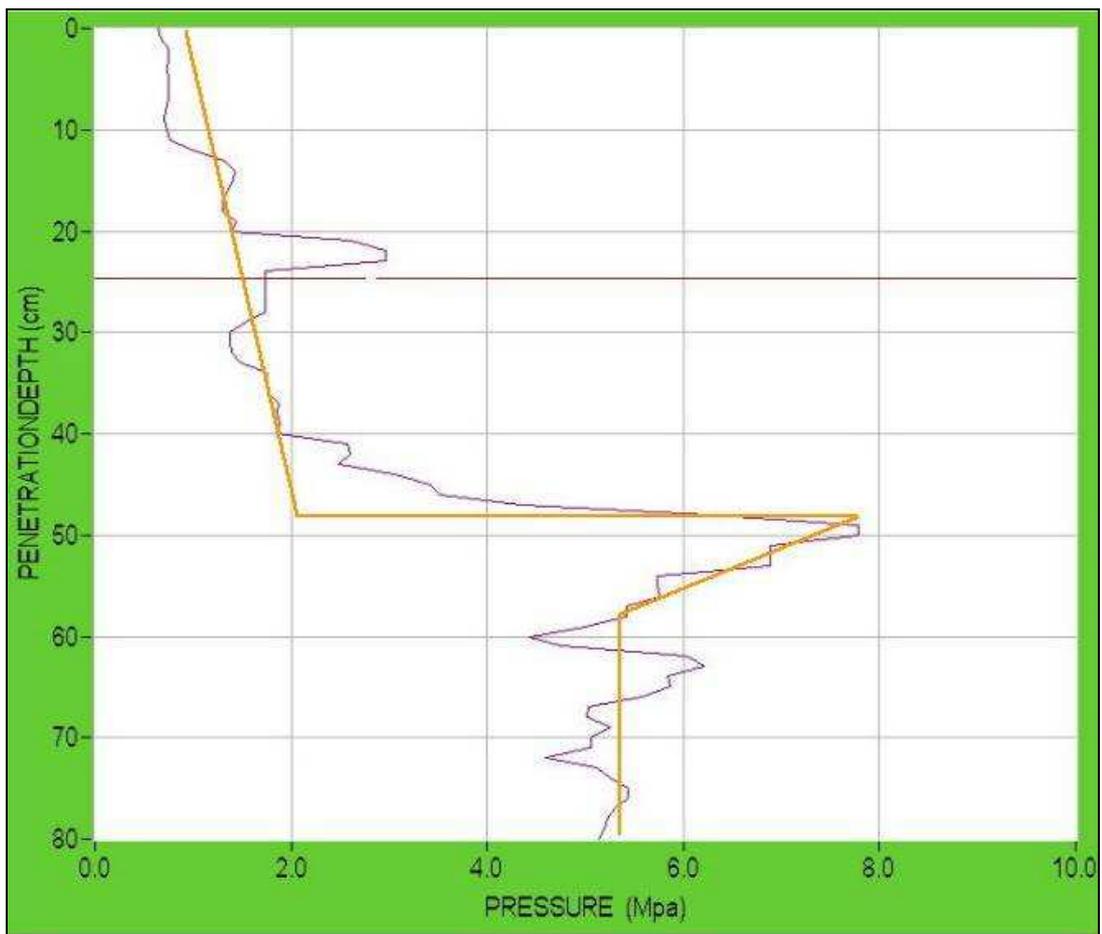


Figure 43 – Même principe que la figure précédente, mais avec une seule courbe, mettant ainsi en évidence le caractère abrupt de l'apparition du *Fragipan*.

Accompagnant la mesure du pénétromètre, un échantillon de terre est également prélevé au niveau de la couche compactée s'il y en a une, à 50 cm de profondeur dans le cas contraire. Cet échantillon est pesé à l'état où il a été prélevé (état humide) et après séchage, afin d'en déduire la teneur en eau pondérale, de manière à ce que toutes les mesures soient comparables.

7.3.1.2.2. Matériel

Le matériel suivant est nécessaire pour les mesures des variables pédologiques :

- tarière pédologique ;
- pénétromètre ;
- sachets pour prélèvement.

7.3.1.3. Phytosociologie

7.3.1.3.1. Méthodologie

L'approche phytosociologique servira, par le caractère indicateur de la végétation, d'outil sur lequel s'appuyer lors de la définition des Unités Stationnelles.

Un relevé phytosociologique est réalisé sur une aire de 4 ares ou dans le cas de reliefs particuliers (versant étroit, fonds de vallon), par une forme rectangulaire. Cette surface de 4

7.3.2. Campagnes secondaires

7.3.2.1. Mise en place de l'inventaire forestier permanent

La mise en place de l'inventaire forestier permanent (convention GxABT-IBGE) se déroulant dans la même période que la campagne principale, nous avons profité de l'installation des placettes permanentes pour juxtaposer des mesures pénétrométriques à un certain nombre de points. La lourdeur des mesures ne permettait pas de couvrir l'ensemble des placettes vu le temps imparti à l'étude, mais une sélection des points d'intérêts a été effectuée. Le Tableau 25 reprend le détail des points inventoriés. La méthode est la même qu'appliquée dans la campagne principale (section 7.3.1.2.1). Le but de ces mesures supplémentaires est de grossir le jeu de données « *Fragipan* » afin d'en déduire, lors du traitement des données, une éventuelle corrélation entre la présence de ce phénomène (ainsi que la profondeur d'apparition) et les autres caractéristiques stationnelles, et en particulier, le relief.

Tableau 25 - Détail des points supplémentaires repris sur la maille de l'inventaire permanent, et ce pour les mesures pénétrométriques seulement.

	Pente < 12°						Som	Pente > 12°		Som	Som
	Concave		Som	Convexe		Som		Concave	Som		
	Froid	Chaud		Froid	Chaud			Chaud			
Aba				2	1	3					3
Aba(b)	5	4	9	7	7	14					23
Abc	9	9	18	35	16	51	1	1	1	1	70
Adp	2		2								2
gADc		1	1								1
SAF		1	1		2	2					3
Total	16	15	31	44	26	70	101	1	1	1	102

7.3.2.2. Réalisation d'un transect avec pénétromètre électronique

Un pénétromètre électronique (*penetrologger* de la marque Eijkelkamp, Figure 45) a également été utilisé afin de décrire de manière plus fine ce phénomène de compaction. Un ensemble de points de sondage a été réparti sur un transect couvrant diverses situations d'un point de vue topographique (Figure 46): bas de pente, pleine pente, haut de pente, etc. En fixant la vitesse de pénétration et la surface du cône utilisé, cet appareil renseigne directement l'indice de cône par rapport à la profondeur, et ce jusqu'à - 80cm.

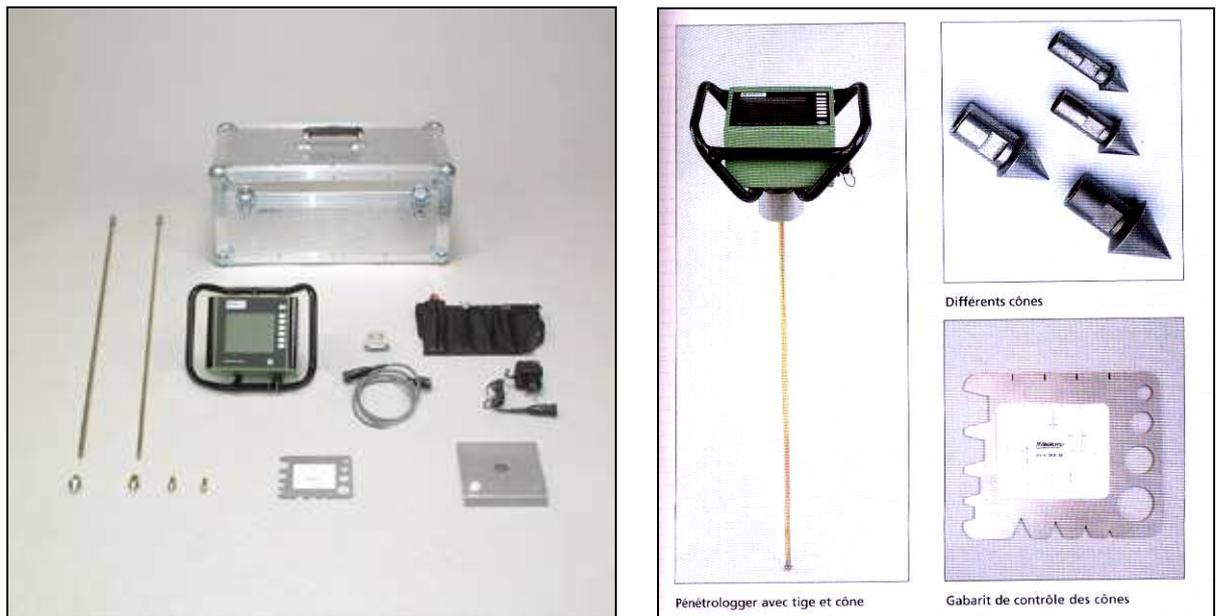


Figure 45 - Penetrologer de la marque Eijkelkamp

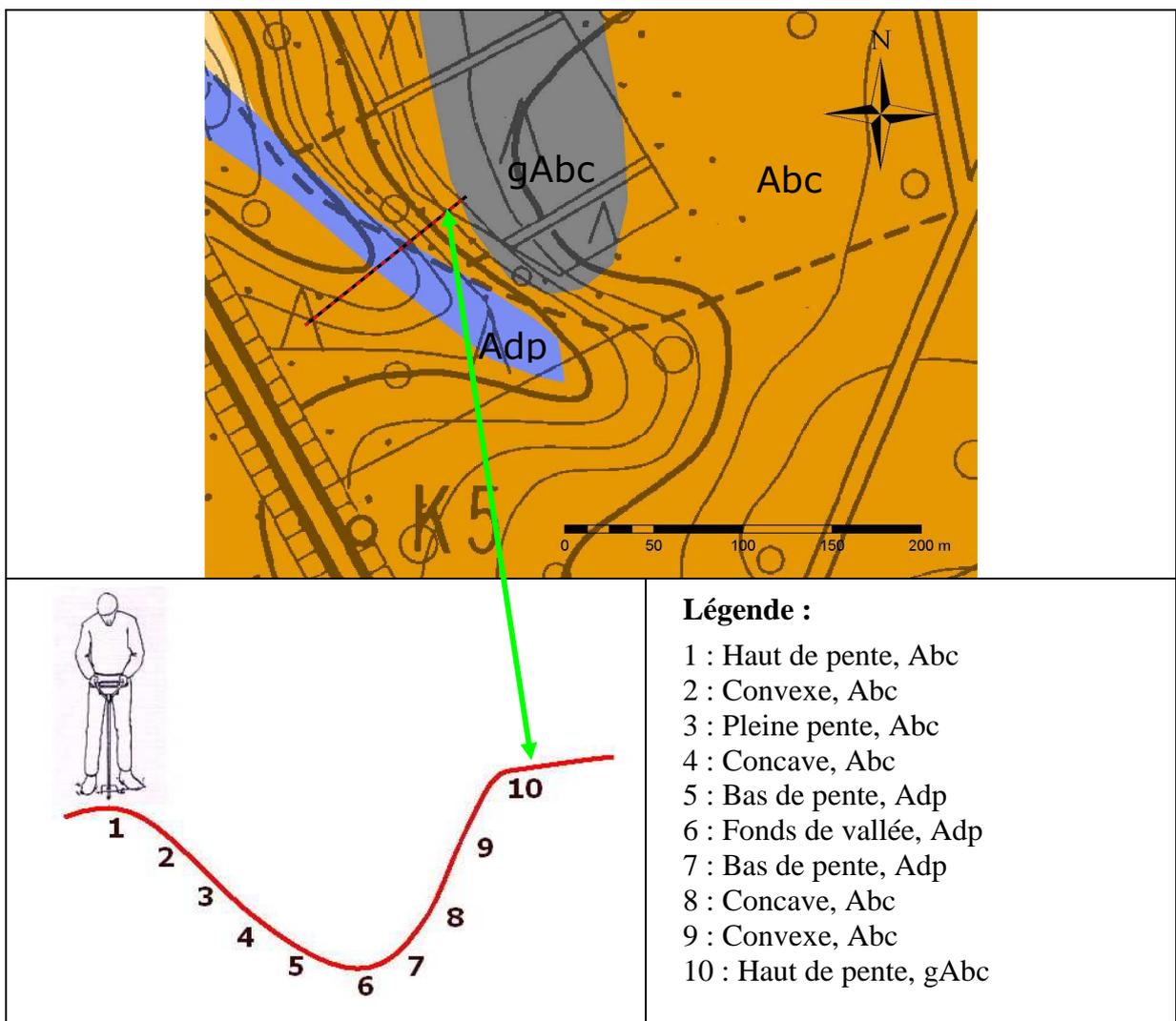


Figure 46 - Représentation du transect effectué avec le pénétromètre électronique

Pour chaque point, une répétition de 10 mesures validées a été effectuée à 50 cm l'une de l'autre afin d'éviter un biais provoqué par une mesure précédente. Par « validées », il est entendu une mesure respectant la vitesse de pénétration imposée et en ne rencontrant pas d'obstacle autre qu'une compaction (ex : pierres, racines). Un grand nombre de mesures peut s'avérer nécessaire. De plus, l'obligation de garder une vitesse de pénétration constante quel que soit l'horizon prospecté demande concentration d'une part et d'autre part une période d'« écolage ». C'est pour ces raisons que la méthode n'a pas été plus largement appliquée dans cette étude.

Ce transect a été réalisé pour tester la faisabilité d'une campagne à plus grande échelle avec utilisation du pénétromètre électronique. Même si cet appareil n'a pas été retenu, ce transect a servi à la calibration et le choix des mesures à noter lors de l'utilisation du pénétromètre non électronique.

7.4. Traitement des données

Reprenant le même ordre que pour la méthodologie, cette section décrit comment les données récoltées lors de la campagne de mesure sont traitées et utilisées pour caractériser au mieux les stations. L'ensemble des traitements statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Minitab (version 15).

7.4.1. Campagne principale

Le traitement des données est abordé pour chaque domaine : topographie, pédologie, phytosociologie. Une synthèse reprend ensuite la manière de combiner ces informations afin de dégager des Unités Stationnelles.

7.4.1.1. Topographie

Les différentes couches issues du Modèle Numérique de Terrain (*Slope, Aspect, Curvature*) sont soumises à une validation terrain au moyen des données récoltées.

Les trois types de mesures (qualitatif, mesures de pente, mesures d'horizon) sont également comparés. Est discutée également, la pertinence de ces mesures en vue de quantifier les apports hydriques d'origine topographique (= apports latéraux).

7.4.1.2. Pédologie

La première partie des données relevées sert à la validation de ce que renseigne la carte numérique des sols. En effet, il apparaît essentiel dans la démarche de caractérisation des Unités Stationnelles que l'unité d'échantillonnage reflète bien ce nous renseigne la cartographie.

La deuxième partie reprend les mesures servant à quantifier les phénomènes de compaction en forêt de Soignes. D'une part, une éventuelle relation entre la présence/profondeur de ce phénomène et la végétation sera étudiée. D'autre part, avec un jeu de données plus développé, nous tenterons de dégager une relation afin de cartographier ce phénomène (voir section 7.4.2.1).

7.4.1.3. *Phytosociologie*

En raison du caractère indicateur de la végétation, les relevés seront un des outils de validation des regroupements d'unités géomorphopédologiques. Ce facteur revêt une importance toute particulière. L'objectif principal de ces relevés de végétation est de les traduire en terme de niveau hydrique et trophique afin de les utiliser comme outil d'aide à la décision. Deux démarches ont été appliquées dans ce sens :

- Une démarche d'expertise : possédant une bonne connaissance du caractère indicateur des espèces rencontrées et/ou s'aidant de différents outils (flore forestière française, cours d'analyse stationnelle, répertoire des groupes écologiques du fichier écologique des essences), l'emplacement dans un écogramme (hydrique x trophique) de chaque relevé est estimé. La végétation naturelle potentielle en est déduite (niveau « association » de la syntaxonomie).

Les données récoltées sont traitées au moyen du logiciel *ECOFLORE* (Bartoli et al., 2000; Bruno & Bartoli, 2001; Foret & Dume, 2006). Nous ne développerons pas ici le fonctionnement de ce programme, rappelons simplement qu'il est basé le caractère indicateur renseigné dans la flore forestière française et pondéré d'une part par le coefficient de Braun-Blanquet et d'autre part par un coefficient pondérateur en relation avec l'intensité du caractère indicateur. Ce sont ces finesses, alliées à une utilisation aisée (encodage, mise en forme des résultats) qui nous ont amenés à choisir *ECOFLORE* plutôt que les coefficients d'Ellenberg, les indices de Noifalise, ou l'outil *ECOPLANT*.

7.4.1.4. *Analyse multivariée*

En ce qui concerne la campagne principale et pour l'analyse des données, ne seront gardées pour l'analyse des résultats que les unités d'échantillonnage répondant à la validation pédologique. De plus, les variables topographiques (pente, concavité, exposition) seront également soumises à validation. Cependant, afin de garder l'ensemble des unités d'échantillonnage validées pédologiquement, ce sont les mesures in situ qui seront utilisées pour l'analyse des données.

Avec ce jeu de données, une analyse multivariée sera développée afin de dégager les facteurs les plus prépondérants dans l'explication des niveaux hydriques et trophiques renseignés par la végétation. Le traitement en question est une Analyse des Correspondances Multiples (ACM).

L'analyse des correspondances multiples (ACM) est une extension de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) appliquée non pas à un tableau de contingence, mais à un tableau disjonctif complet. Cette méthode statistique permet d'étudier des données sous la forme d'un

tableau d'échantillons décrits par plusieurs variables qualitatives. Les variables prises en compte (au nombre de 9) dans cette étude sont les suivantes (le chiffre entre parenthèse représente le nombre de possibilités de chaque variable) : substrats (3), texture (2), drainage (4), développement de profil (5), géologie (4), humus (3), niveau hydrique (3), niveau trophique (4), relief (4). Le détail de chaque variable est développé dans la partie résultats.

7.4.2. Campagnes secondaires

7.4.2.1. *Mise en place de l'inventaire forestier permanent*

Le grossissement du jeu de données permet de s'intéresser de manière plus précise aux deux grands types de sols de la zone d'étude, ceux-ci étant considérés comme « porteurs » du phénomène du *Fragipan*. L'analyse de ces données s'intéressera à l'éventuelle corrélation entre la profondeur d'apparition d'une compaction éventuelle et le relief ou entre l'exposition et la profondeur d'apparition de la couche compactée.

C'est l'indice de cône qui est utilisé ici. Les données de teneur en eau pondérale n'étant pas toutes encodées, une comparaison entre ces indices de cône et l'humidité sera développée dans un rapport ultérieur. Cette teneur en eau pondérale a une grande influence sur la force à déployer lors d'une mesure pénétrométrique. Elle en a beaucoup moins quant à la profondeur de la couche compactée, qui est l'info principale qui nous intéresse dans le cadre de la caractérisation des potentialités forestières.

7.4.2.2. *Réalisation d'un transect avec pénétromètre électronique*

Des dix courbes enregistrées pour chaque point de sondage, une courbe moyenne est calculée. Pour certains points de sondages, des courbes fort différenciées des autres ont été supprimées. Rappelons que cette compaction peut-être très hétérogène, même à l'échelle de la station. Il ne faut donc pas en déduire une image fixe et rigide de ce phénomène, ces courbes représentent la profondeur d'apparition éventuelle de la compaction sur la zone, ainsi que l'intensité moyenne de cette compaction.

En guise de perspective, une méthodologie appliquant une grille de sondage (mailles de 50 x 50 cm) pourrait être appliquée afin de juger l'homogénéité du phénomène sur la station. Cependant, le grand nombre de mesures à effectuer et le risque de rencontrer un obstacle dans le sol (racine, pierres) rendent le procédé lourd et difficile à mettre en œuvre. Au vu de la campagne de mesure, nous estimons une grille minimale de 4 mètres sur 4 (64 mesures, à vérifier empiriquement), à disposer aussi loin des arbres (et souches) que la configuration du site le permet.

Chapitre 8. Résultats et discussion

Dans sa première partie, ce chapitre présente et discute les résultats les uns après les autres dans la même structure que le chapitre méthodologique. Une deuxième partie sera consacrée à la synthèse des résultats pour aboutir à l'élaboration du catalogue des stations.

8.1. Campagnes de mesure

8.1.1. Campagne principale

8.1.1.1. Topographie

8.1.1.1.1. Résultats

La validation des couches dérivées du MNT (*Slope*, *Aspect*, *Curvature*) a été effectuée en comparant ces données MNT aux données récoltées sur le terrain. Une droite de régression est calculée à partir de ces couples de variables (Figure 47, Figure 48, Figure 49).

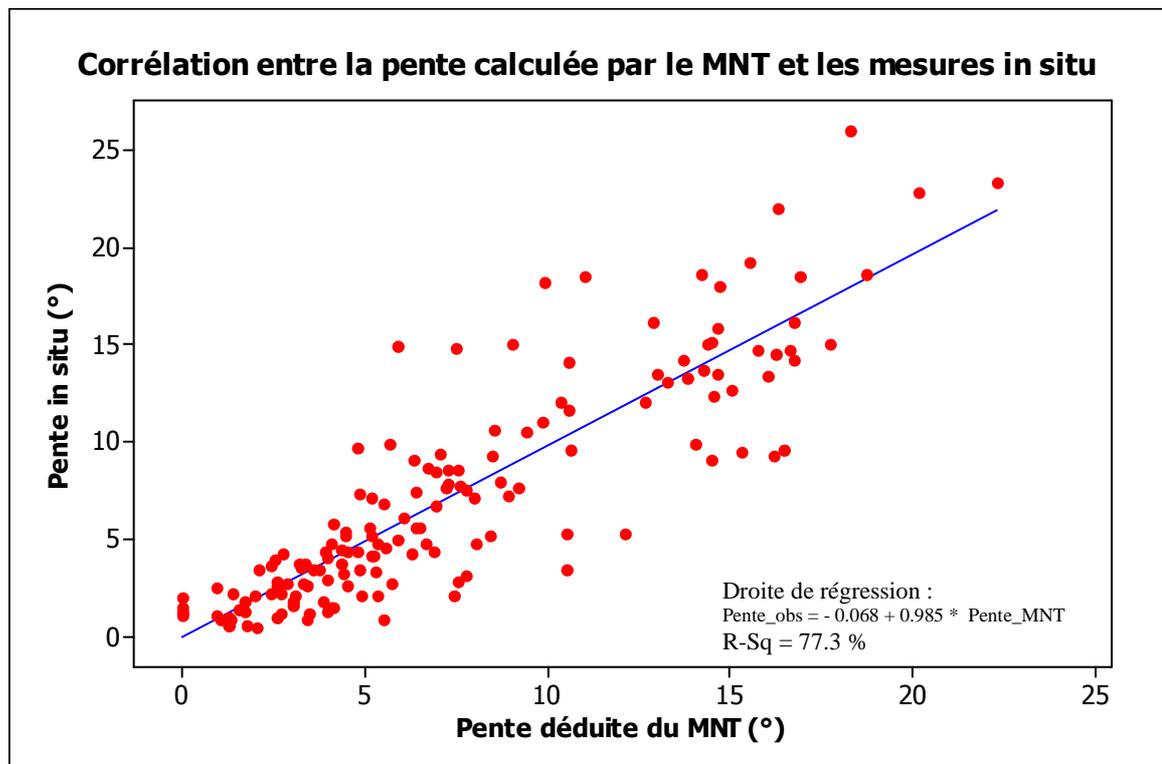
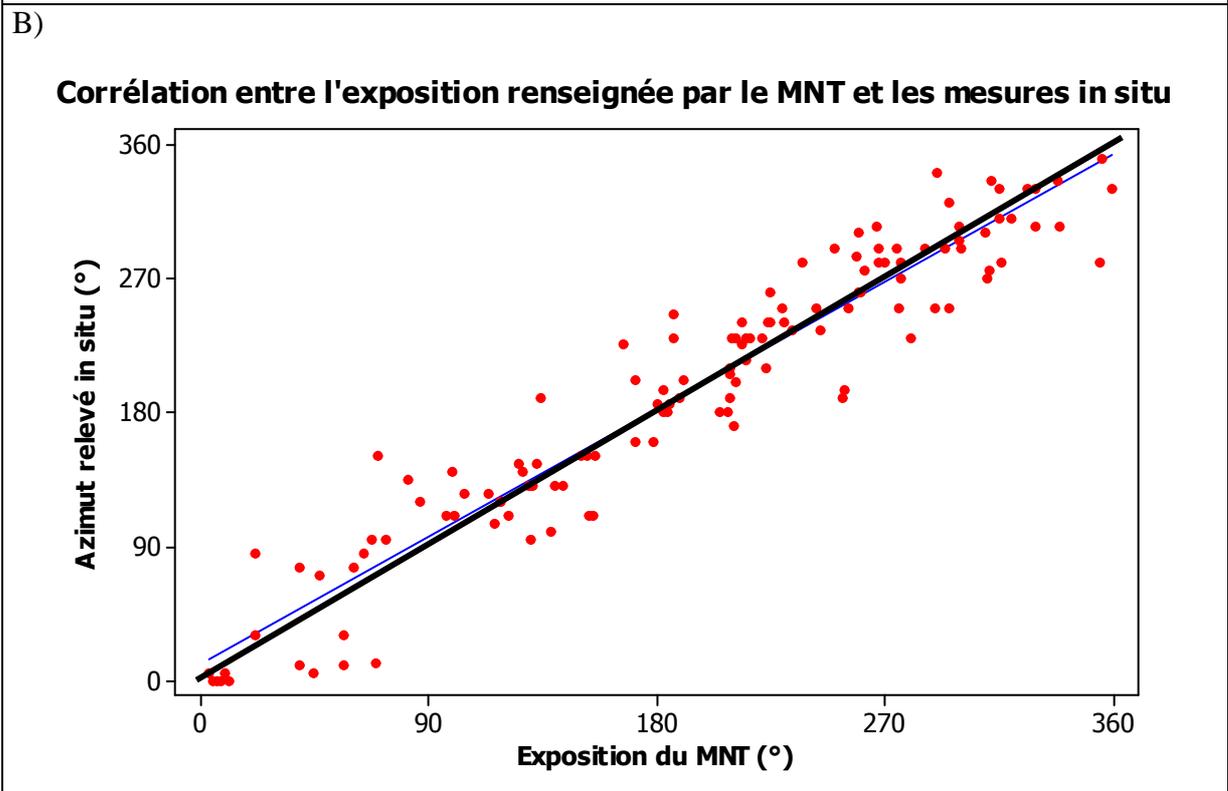
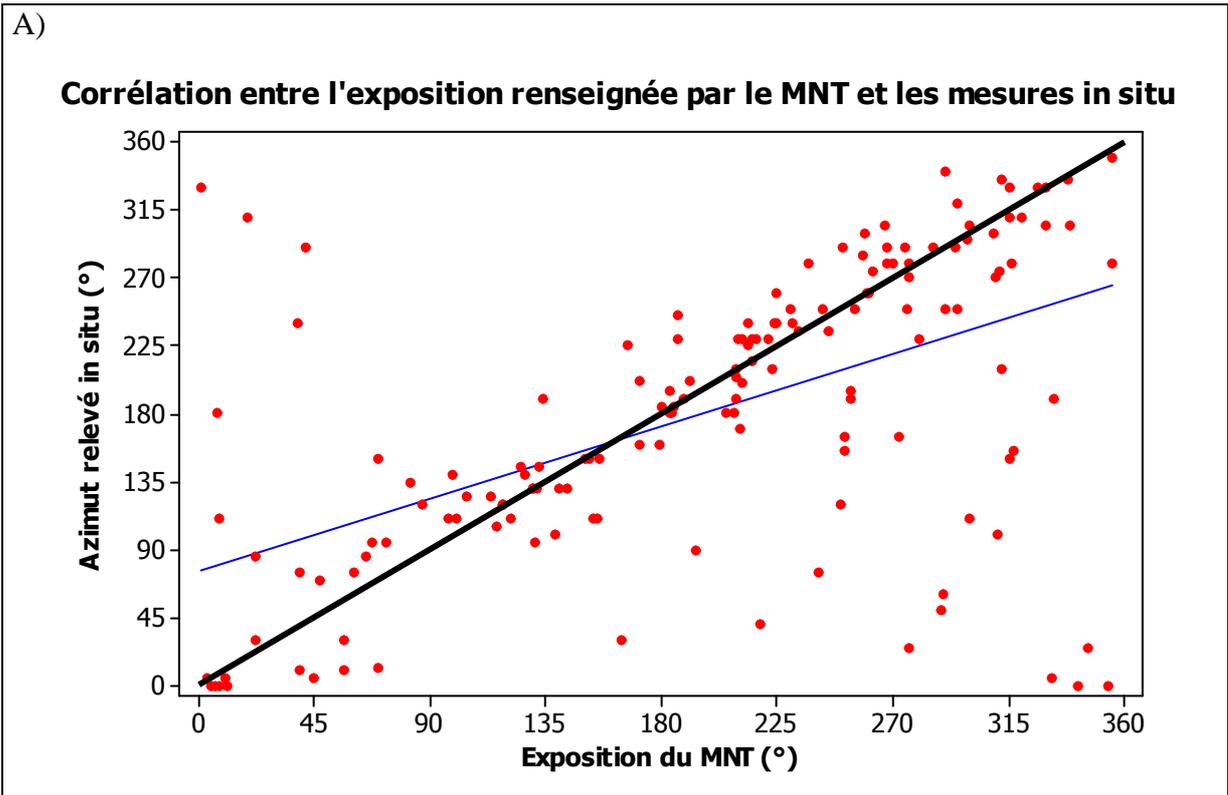


Figure 47 - Validation de la variable « pente » calculée à partir du MNT par la fonction *Slope*

La droite de régression obtenue pour le facteur pente (Figure 47) correspond presque à la droite parfaite « *Pente observée = Pente déduite du MNT* ». Néanmoins le R-Sq¹ (77.3%) nous indique une relative dispersion des données par rapport à cette droite. Cette dispersion s'accroît avec l'accroissement de la pente. Au final, le facteur pente déduit du MNT semble tout à fait tenir la route dans la réalité.

En ce qui concerne le facteur exposition (Figure 48, les 2 pages suivantes), l'analyse a été menée en 3 étapes. La première analyse la relation entre l'exposition mesurée sur le terrain et déduite du MNT pour l'ensemble des données. Le coefficient de détermination est faible ($r^2 = 0,30$), mais il apparaît dans le graphique qu'une partie de la dispersion des points peut être expliquée : les valeurs de 0 et 360° expriment en fait la même exposition, tandis que les valeurs qui se distinguent d'environ 180° sont manifestement des visées inversées. L'élimination de ces points améliore très nettement la relation ($r^2 = 0,91$). Dans une troisième étape, en ne retenant que les expositions pour des pentes significatives ($>6^\circ$), on évite les mesures pour lesquelles l'identification de l'orientation de la pente était incertaine. Cela n'apporte pas une amélioration conséquente ($r^2 = 0,95$). On peut donc considérer que les mesures de terrain valident nettement l'estimation de l'exposition par SIG.

¹ R-Sq correspond au coefficient de détermination r^2 . C'est la part de la variance expliquée par le modèle, dans ce cas-ci la droite de régression.



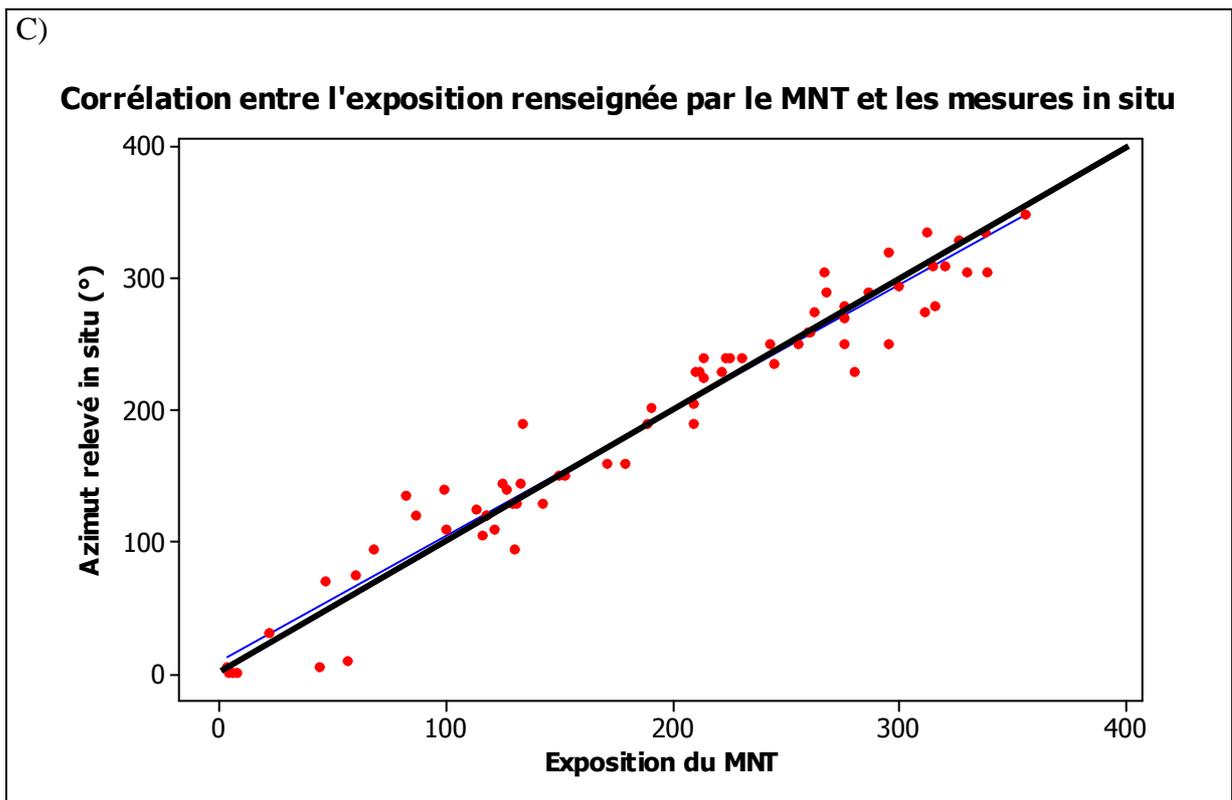
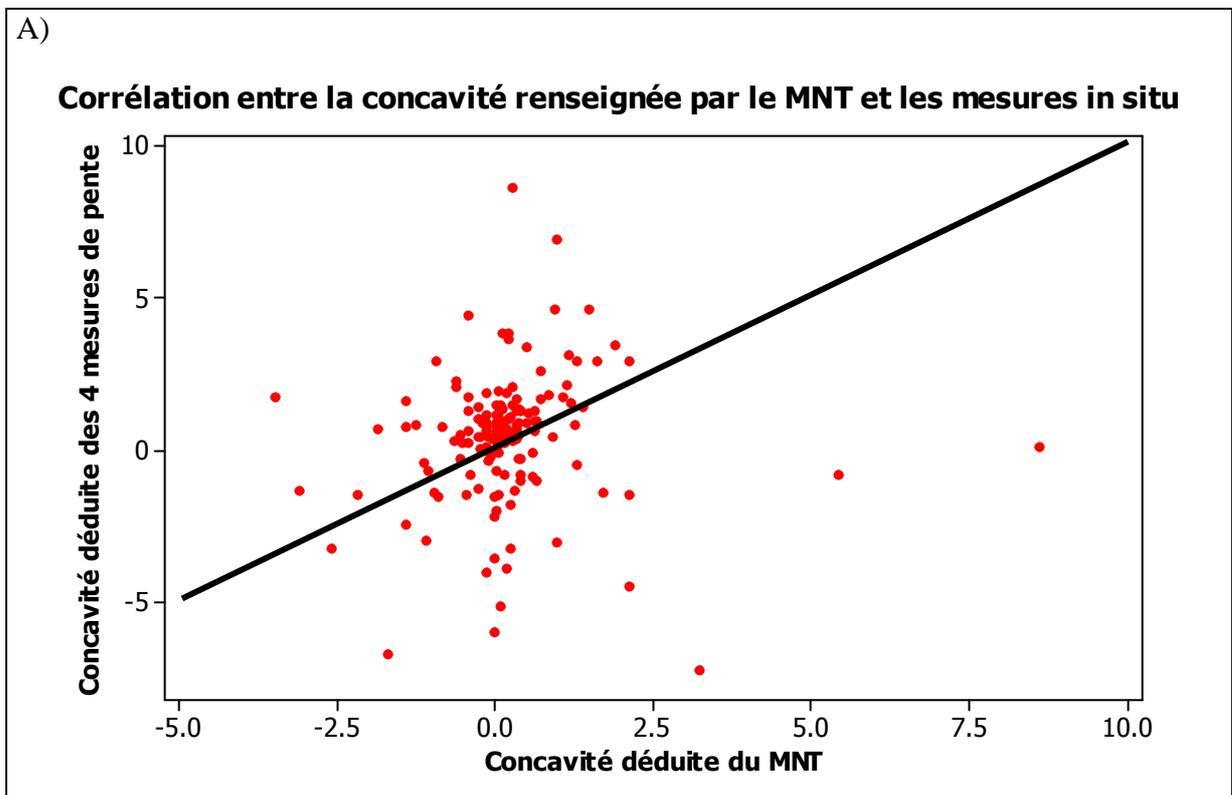


Figure 48 - Validation de la variable « exposition » calculée à partir du MNT par la fonction *Aspect*. L'azimut 0° ou 360° correspond au Nord, donc 90° correspond à l'Est, 180° au Sud et 270° à l'Ouest. A) avec l'ensemble du jeu de données ; B) avec suppression des données incohérentes ; C) avec les données ne comportant que les pentes supérieures à 6°.



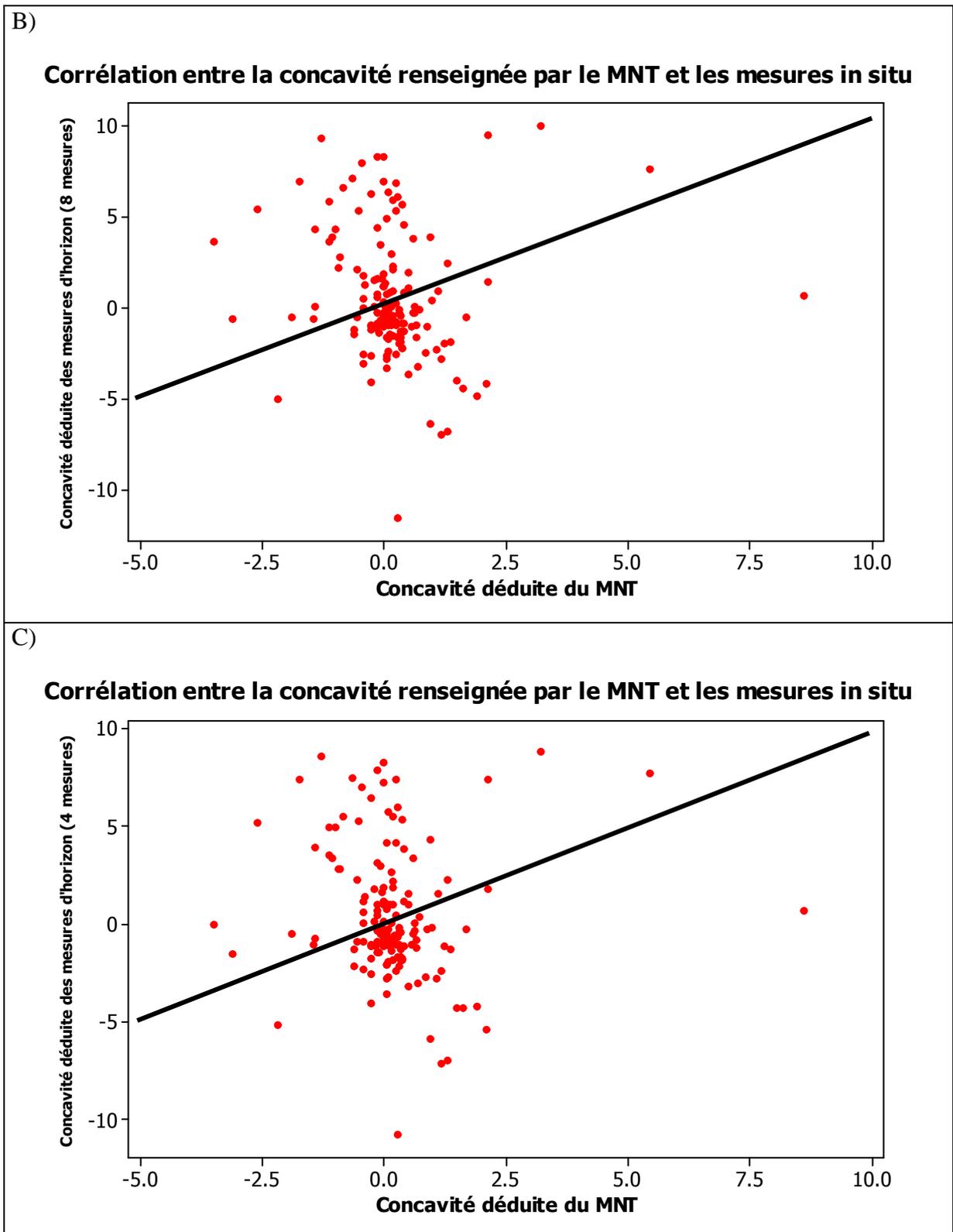
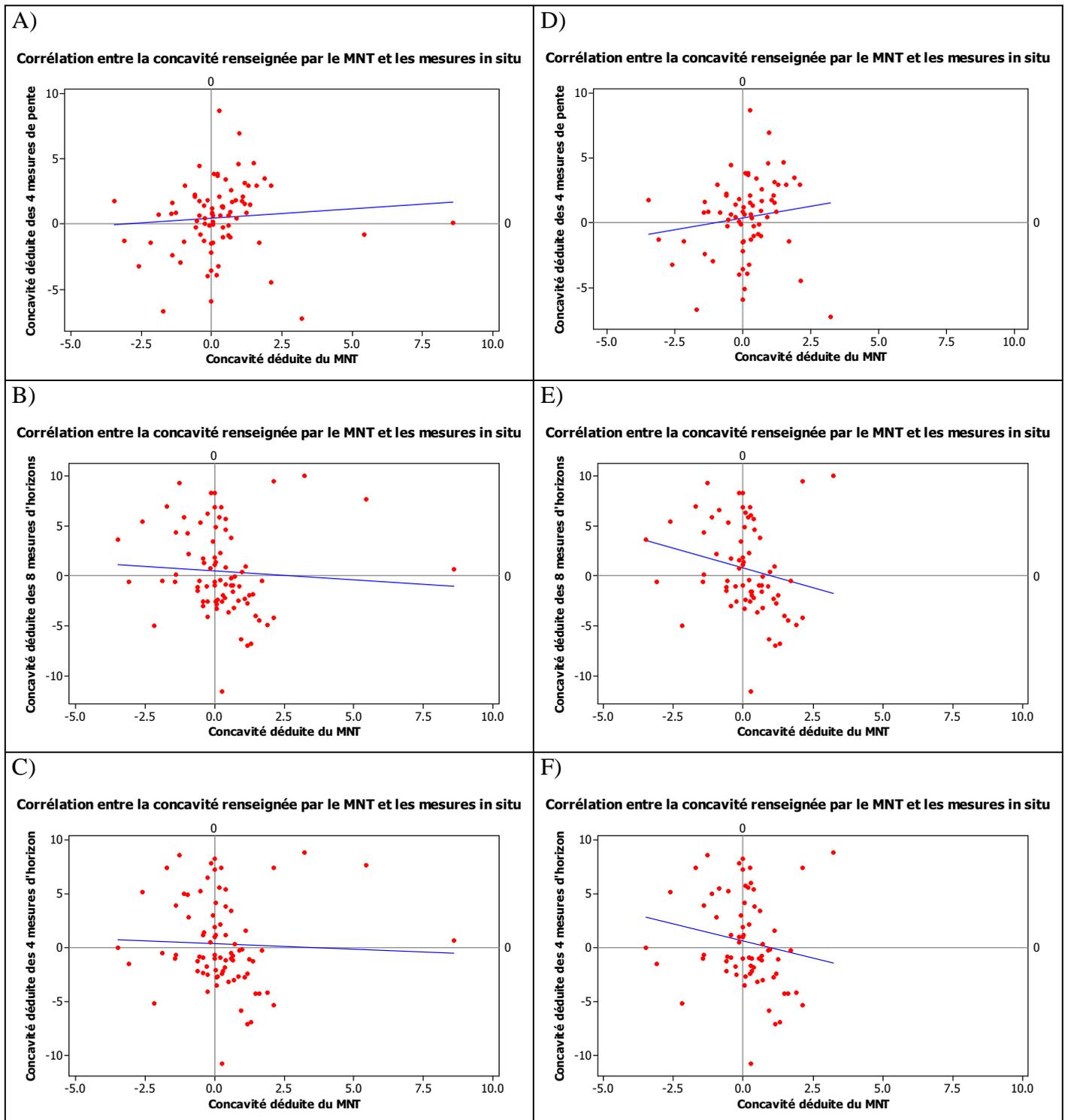


Figure 49 - Validation de la variable « concavité » calculée à partir du MNT par la fonction *Curvature*. Les deux types de mesures quantitatives sont exploités : concavité déduite des 4 mesures de pente, concavité déduite des 8 mesures d'horizon et enfin concavité déduite de 4 mesures d'horizon afin de déterminer si ces 4 mesures sont suffisantes pour caractériser le site.



L'échantillonnage de la campagne principale réduisait les différentes variables topographiques en variables qualitatives pour une stratification de celui-ci. Le Tableau 26 reprend la classification qualitative de ces différentes variables, ainsi que la validation terrain s'y rapportant.

Tableau 26 - Validation des variables topographiques sous leur forme qualitative

Types de mesures	Classification qualitative	Nombre d'unités validées	Nombre total d'unités
Validation Pente			
2 mesures de pente	< 12° et > 12°	138 / 158	
Validation Concavité			
4 mesures de pente	Concave et Convexe	110 / 158	
8 mesures d'horizon		114 / 158	
4 mesures d'horizon		113 / 158	
Validation exposition			
Azimut pente forte	Froid et		
pour > 12° MNT	Chaud	31 / 43	
pour > 12° in situ		31 / 39	

- Si l'on désire comparer les différentes méthodes de mesures de la topographie, la donnée qualitative estimée in situ peut servir de « témoin ». Pour chaque classe topographique (fonds de vallée, a pic, haut de pente, etc), l'affectation concave/convexe est donnée selon les différentes méthodes quantitatives (Figure 50).

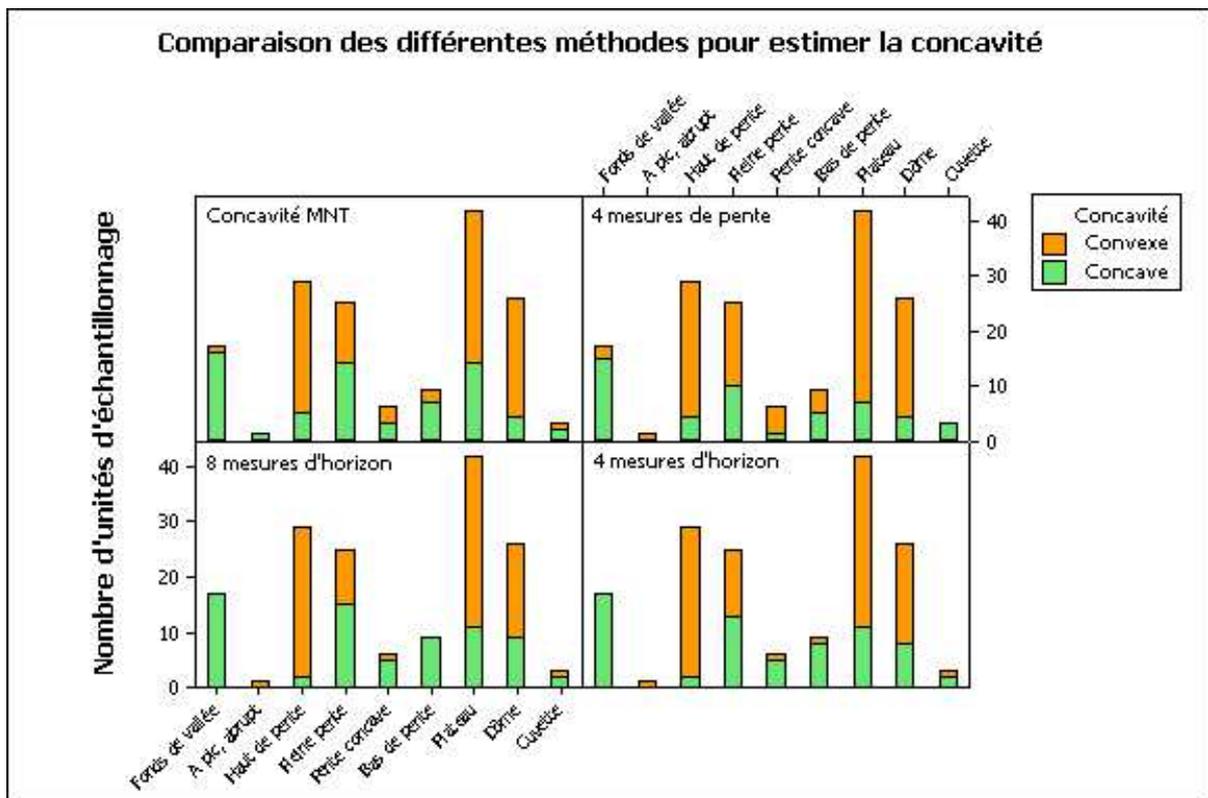


Figure 50 - Affectations des unités d'échantillonnage selon les 4 estimations quantitatives (exprimées en concave/convexe) , ventilée par classes qualitatives estimées in situ

Selon les classes témoins, on s'attendra à une affectation dominante selon le schéma suivant :

- Concave :
 - fonds de vallée ;
 - pente concave ;
 - bas de pente ;
 - cuvette.
- Convexe :
 - a pic, abrupt ;
 - haut de pente ;
 - dôme.
- L'affectation *pleine pente* et *plateau* sera partagée entre les deux.

8.1.1.1.2. Discussion

Malgré une dispersion du nuage de points qui peut s'avérer large par endroit, la Figure 47 montre une forte corrélation entre la *pente* renseignée par le MNT et les mesures effectuées sur le terrain. Dès lors, ce facteur *pente* imbriqué dans une cartographie finale d'évaluation sylvicole pourra être utilisé. Même remarque en ce qui concerne l'exposition, la corrélation permet une utilisation du MNT.

La validation concernant la concavité renseignée par le MNT semble beaucoup plus compromise (Figure 49). Deux remarques sont à mettre en exergue. Premièrement, le jeu de données reste fort concentré autour de la valeur 0, rendant ainsi hasardeux la déduction d'une droite de régression. Deuxièmement, les valeurs de la concavité déduite du MNT sont celles de la couche brute issue du traitement *Curvature* sous le logiciel Arcgis. Rappelons que la couche finale représentant la concavité de la zone d'étude a subi une classification binaire *concave/convexe* ainsi qu'un processus de lissage au niveau des pixels de ce raster *concave/convexe*. Si l'on désire exploiter les valeurs brutes de la concavité, les 4 mesures de pente se rapprochent plus de ce que renseigne la couche brute issue du MNT. D'un point de vue qualitatif, en prenant en compte la couche finale (reclassification binaire et lissage), la Figure 50 montre une précision acceptable des zones concaves et convexes pour le MNT.

Après avoir abordé les facteurs *pente*, *exposition* et *concavité*, les figures développées dans la partie résultats permettent de comparer les différents types de mesures de la topographie entre elles. Deux tendances sont à souligner :

- Une tendance « stationnelle » : les 4 mesures de pente sont réalisées à 20 mètres du centre de l'unité d'échantillonnage. Ces mesures sont dès lors représentatives d'un carré de 40 mètres de cotés, à savoir 16 ares de surface.
- Une tendance « paysagère » : les mesures d'horizons vont bien au-delà des 20 mètres cités au point précédent. Ce type de mesure rend compte des lignes de crêtes, lignes de rupture et fonds de vallée de la zone de l'unité d'échantillonnage. Comme le montre la Figure 50, elle se rapproche de ce que renseigne l'estimation qualitative et visuelle du relief. En comparant 8 ou 4 mesures d'horizon, il s'avère que les 4 mesures sont suffisantes pour caractériser la concavité de l'unité d'échantillonnage.

Dans le cas présent de la forêt de Soignes, aucune des tendances n'est à privilégier ou à proscrire. Les conclusions restent très similaires. Il n'en sera peut-être pas de même dans une zone d'étude ayant un relief plus accidenté.

En conclusion, il serait utile d'approfondir la caractérisation de la forme du relief par SIG, en testant d'autres algorithmes. Une tâche mobilisatrice de temps qu'il n'est pas envisageable dans cette étude.

8.1.1.2. Pédologie

8.1.1.2.1. Résultats

Le premier objectif du volet pédologie était de valider l'information fournie par la Carte Numérique des Sols. Sans reprendre l'ensemble des informations recueillies in situ, 104 unités d'échantillonnage sur 158 ont été retenues comme valides. Ces unités serviront à la caractérisation des Unités Stationnelles.

Le jeu de données de l'étude pénétrométrique sera gonflé par les mesures effectuées en profitant de la mise en place de l'inventaire forestier permanent. Les résultats de cette partie sont développés à la section 8.1.2.1.

8.1.1.2.2. Discussion

Les différents facteurs renseignés par la carte des sols ont été soumis à validation : texture, hydromorphie, l'ensemble du profil, l'éventuel substrat sous-jacent. Sur les 158 unités d'échantillonnage, 54 ne correspondaient pas à ce que renseignait la carte des sols. Deux sources d'erreur peuvent survenir :

- Le fait que l'on s'intéresse à des types de sols représentés faiblement du point de vue surfacique implique une éventuelle imprécision spatiale soit du GPS lors de la visite terrain, soit de la cartographie.
- Des situations très sporadiques et marginales du point de vue surfaciques peuvent être englobées dans un polygone hétérogène en matière de type de sol. En effet, la carte numérique des sols est éditée dans une version 1/20.000ème. La prospection en vue de sa confection couvre une échelle de 1/5.000ème mais des simplifications ont été de mise en passant à ce format 1/20.000ème. De ce fait, certains affleurements ou autres situations particulières peuvent ne pas apparaître sur la carte numérique.

8.1.1.3. *Phytosociologie*

8.1.1.3.1. *Résultats et discussion*

Comme renseigné à la section 7.4.1.3, les relevés phytosociologiques ont été analysés par le logiciel ECOFLORE. En fonction des espèces présentes dans le relevé, ce logiciel calcule le barycentre du relevé dans l'écogramme composé en abscisse du niveau trophique et en ordonnée du niveau hydrique.

Les différents écogrammes illustrés dans cette partie phytosociologie possèdent la même échelle. Cette échelle est celle de la flore forestière française et transposée dans ECOFLORE sous forme chiffrée. Le Tableau 27 reprend le comparatif avec la dénomination qualitative.

Tableau 27 - Equivalence entre l'échelle chiffrée du programme *ECOFLORE* et l'échelle renseignée dans la flore forestière française.

Ordonnée	Sigle	Niveau hydrique (Espèces : milieu)
entre 0 et 1	H	Hygrophiles : inondé en permanence
entre 1 et 2	hh	Mésohygrophiles : humide en permanence
entre 2 et 3	h	Hygroclines : assez humide
entre 3 et 4	f	Mésohygroclines : milieu frais
entre 4 et 5	m	Mésophiles : bien drainé, drainage moyen
entre 5 et 6		
entre 6 et 7	X	Mésoxérophiles : sec, notamment l'été
entre 7 et 8	XX	Xérophiles : très sec en permanence
Abscisse	Sigle	Niveau trophique (Espèces : milieu)
entre 0 et 1	AA	Hyperacidiphiles : très acide
entre 1 et 2	AA	Acidiphiles à très acidiphiles : acide
entre 2 et 3	aa	Mésoacidiphiles à faiblement acidiphiles : assez acide
entre 3 et 4	a	Neutroacidiclins à acidiclins : faiblement acide
entre 4 et 5	n	Neutrophiles à mésoneutrophiles : neutre
entre 5 et 6	b	Calcaricoles, calcicoles, neutrocalcicoles : calcaires

Afin d'éviter un éventuel biais induit par un choix de plantation du sylviculteur, la strate arborée n'est pas reprise dans le calcul. Autre particularité, mais cette fois inféodée à la zone d'étude, l'omniprésence dans les relevés de la grande luzule (*Luzula sylvatica* (Huds.) Gaud.) pose la question de son caractère indicateur en forêt de Soignes (*ECOFLORE* la verse dans le groupe des acidiphiles à mull moder). Dès lors, nous avons analysé le caractère de ces relevés avec et sans cette espèce. Les Figure 51 et Figure 52 illustrent les conséquences en terme de déplacement dans l'écogramme de la prise en compte ou non de cette espèce. Nous observons un déplacement des relevés vers un niveau trophique plus riche, moins acide. Le niveau hydrique ne change pas.

Les sols ayant été soumis à validation, il reste donc 104 relevés dont ont été retirées les espèces de la strate arborée et l'espèce *Luzula sylvatica*. La Figure 53 (4 prochaines pages) reprend les barycentres des relevés phytosociologiques, ceux-ci étant ventilés par type de sol.

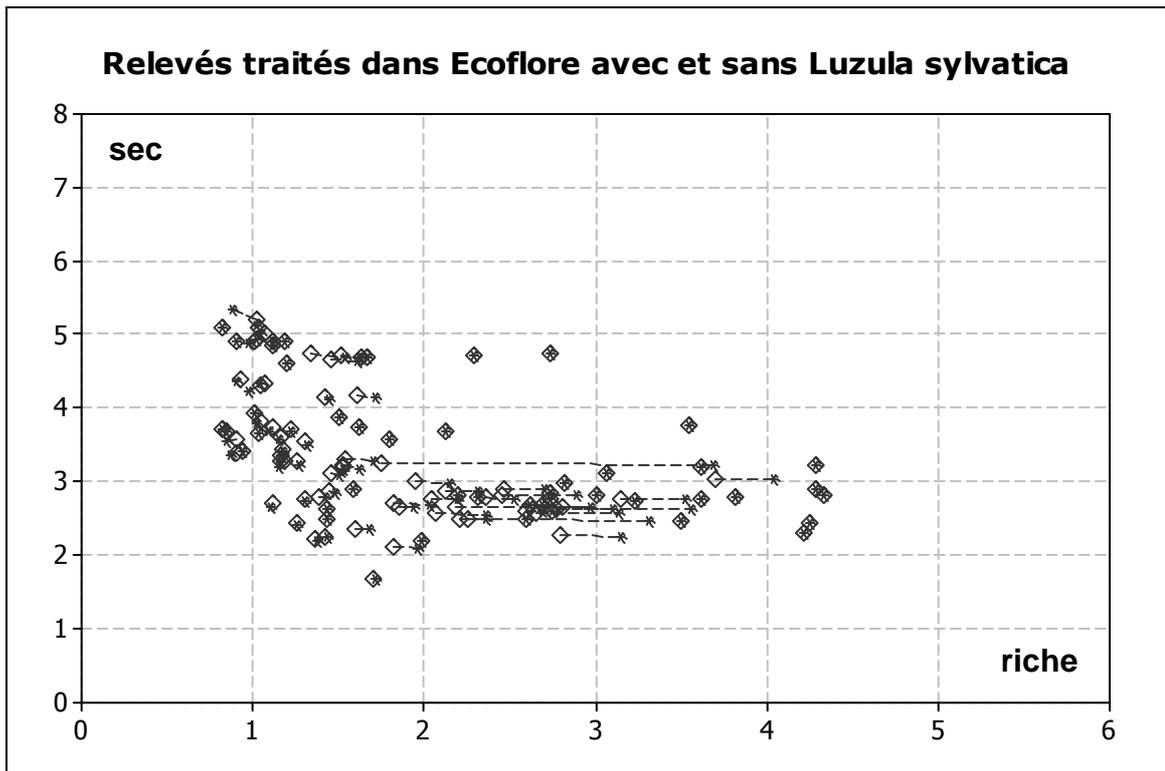
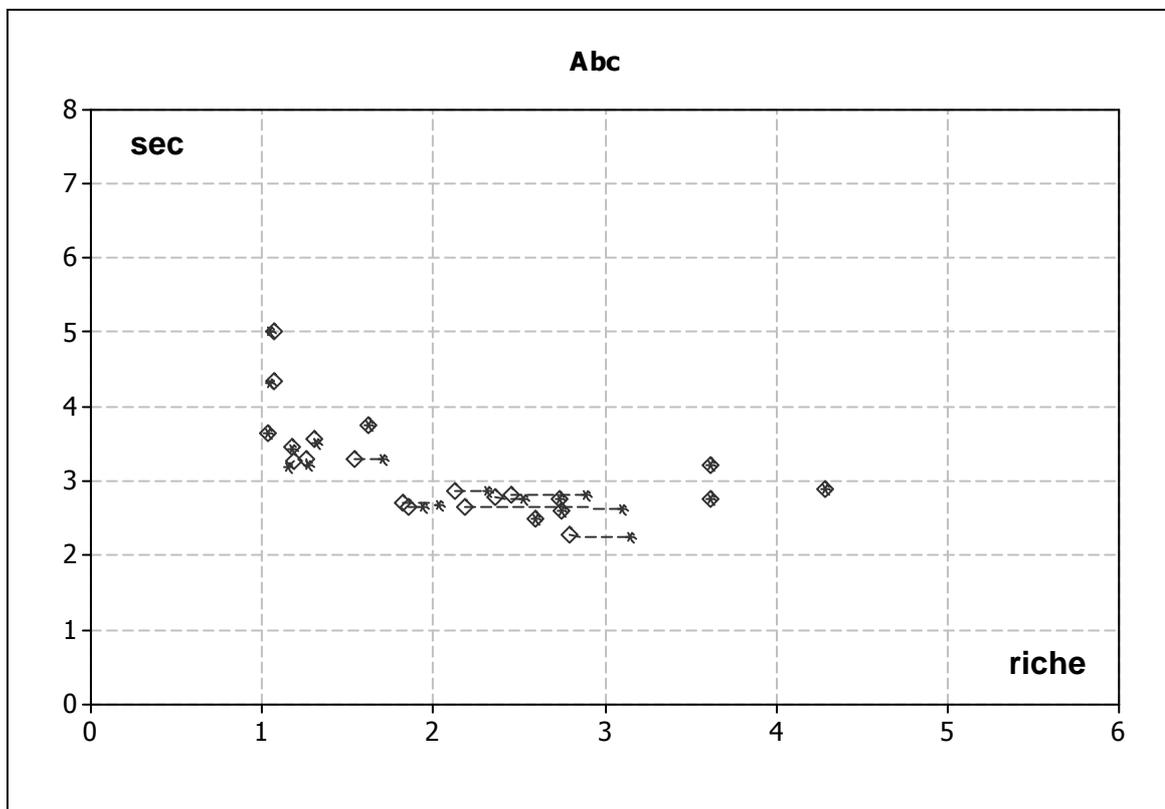


Figure 51 - Déplacements dans l'écogramme du barycentre de chaque relevé (jeu de données complet) si l'espèce *Luzula sylvatica* soit prise en compte ou non. Les losanges représentent les relevés avec *Luzula sylvatica*, les étoiles sans prise en compte de cette dernière.



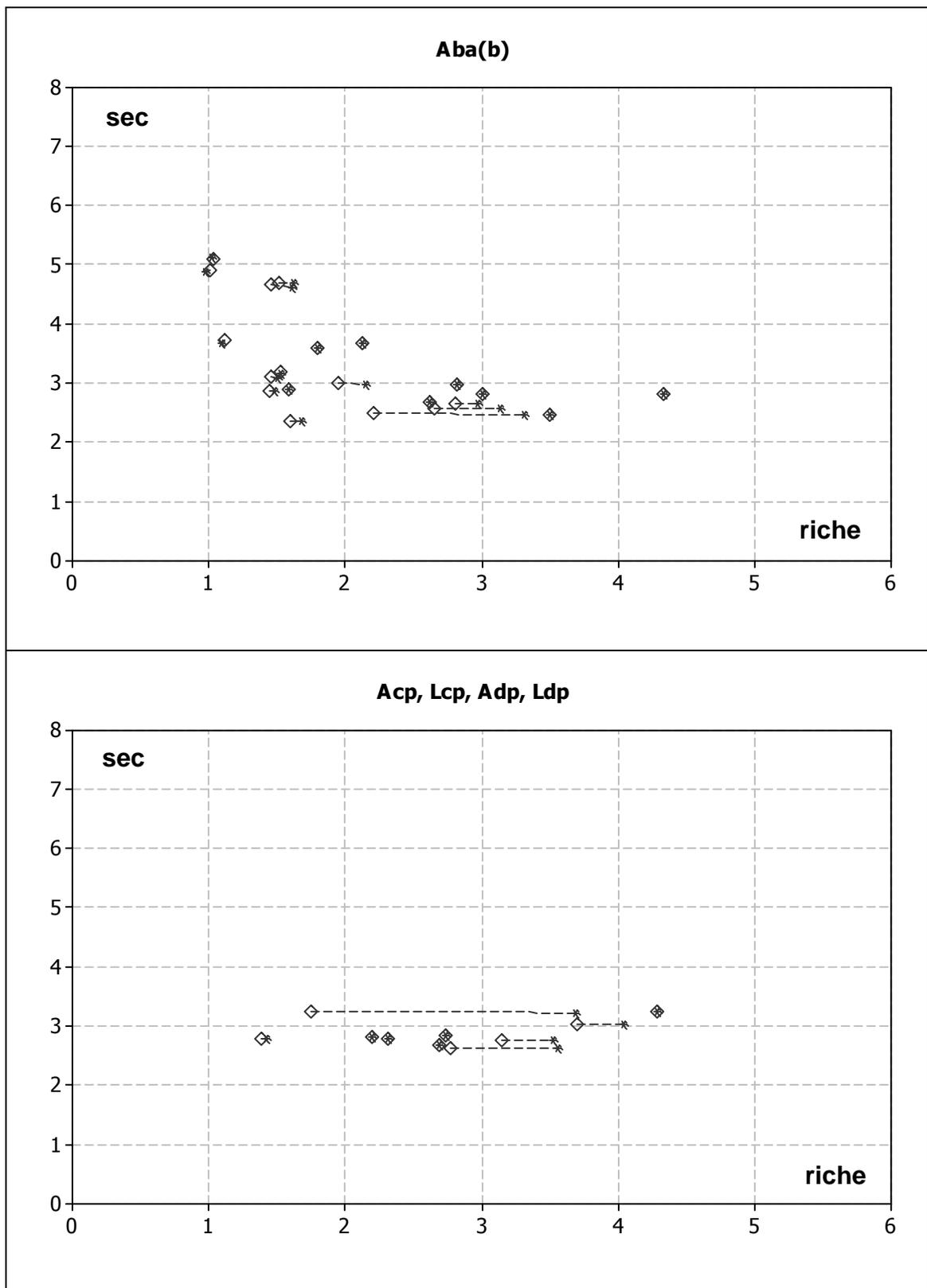
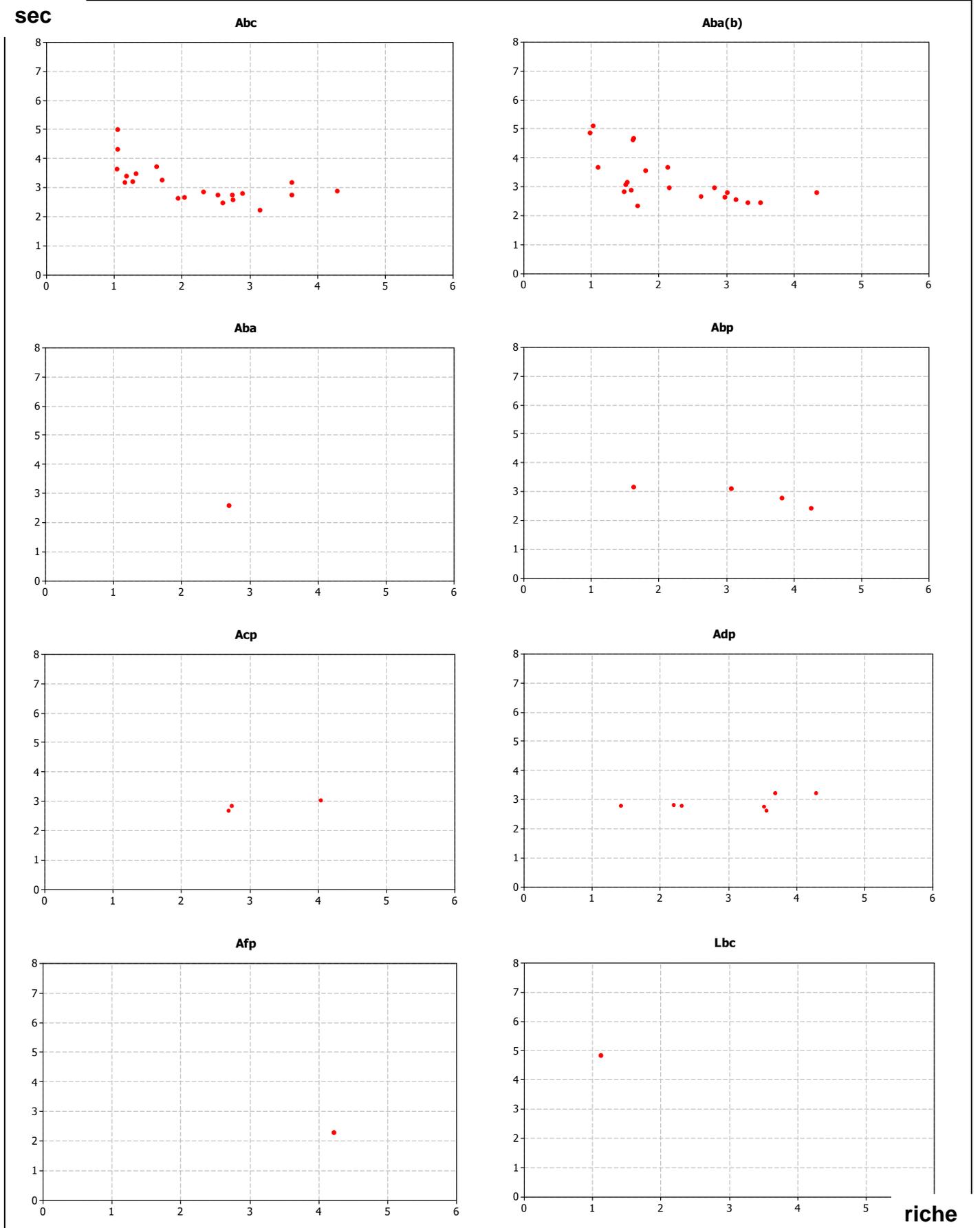
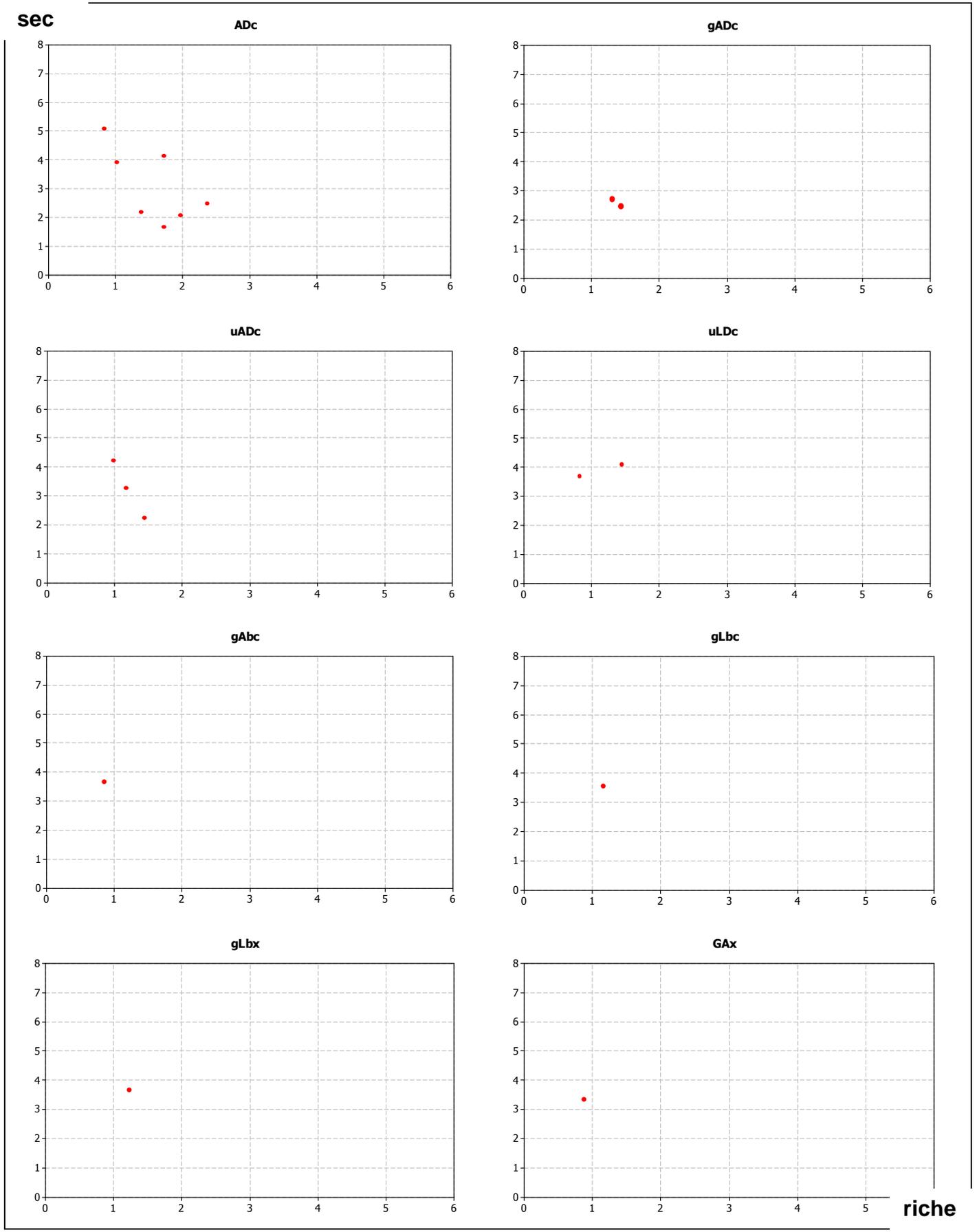


Figure 52 - Déplacements dans l'écogramme du barycentre de chaque relevé (ventilé par type de sols) si l'espèce *Luzula sylvatica* est prise en compte ou non. Les losanges représentent les relevés avec *Luzula sylvatica*, les étoiles sans prise en compte de cette dernière.

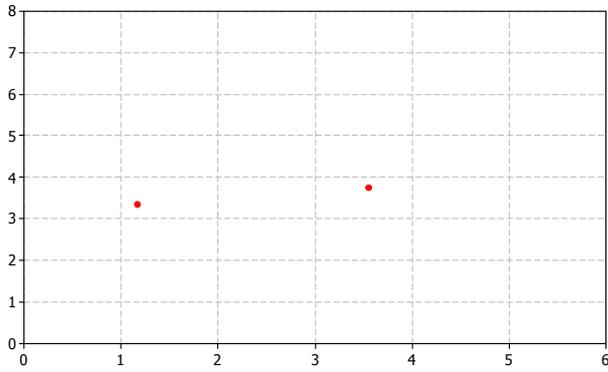
Figure 53 - Barycentres des relevés de végétation ventilés par type de sol. Source : programme *ECOFLORE*.



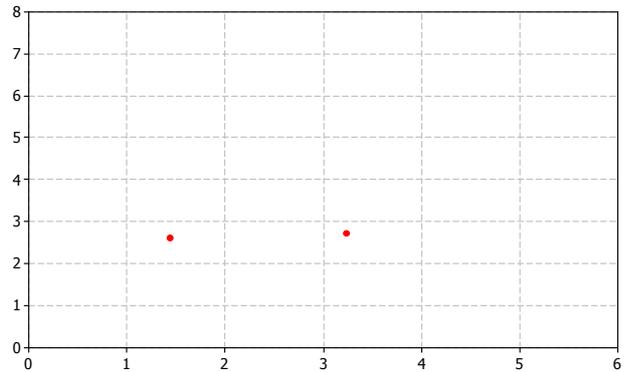


sec

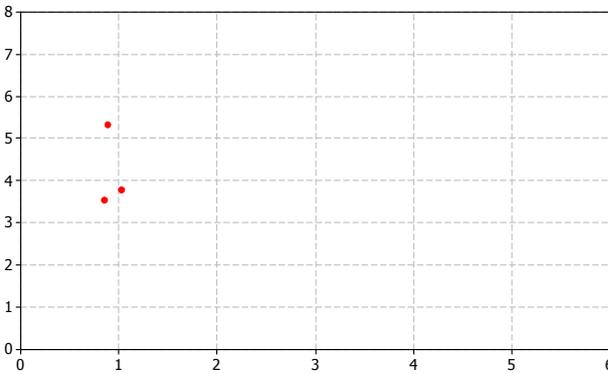
sAbc



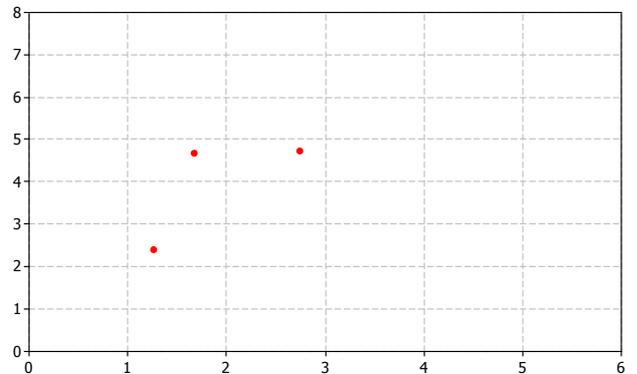
sAAx



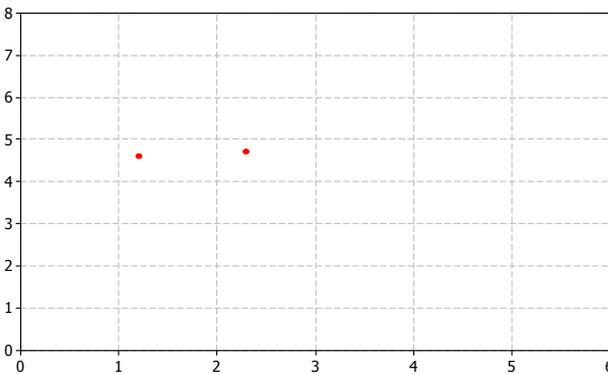
sLba



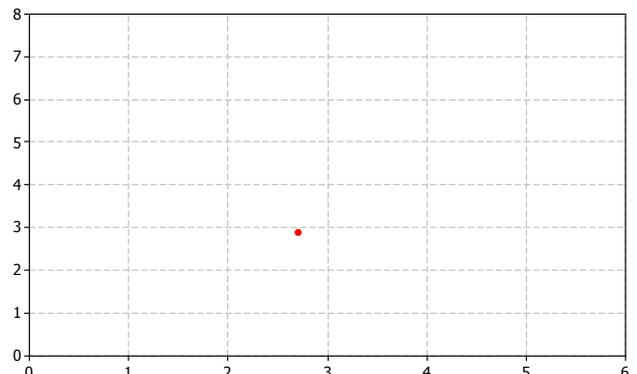
sLbc



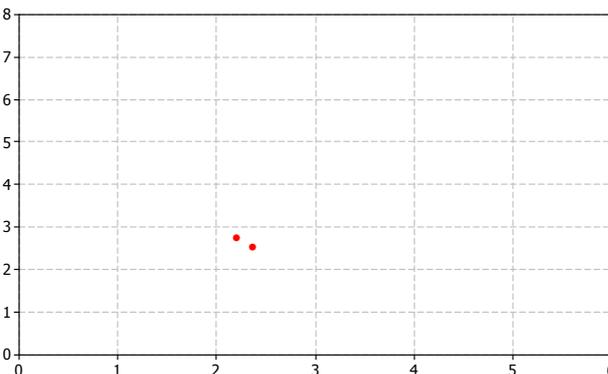
wAbc



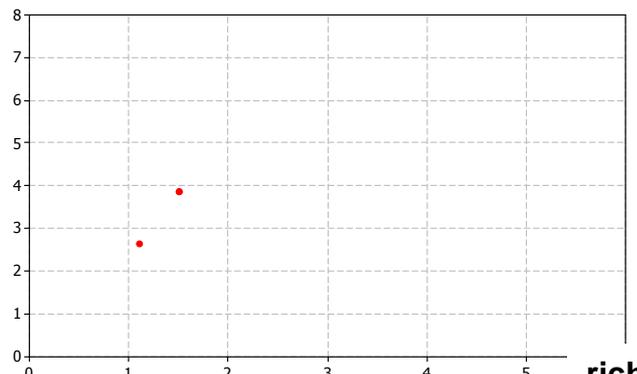
wLbx



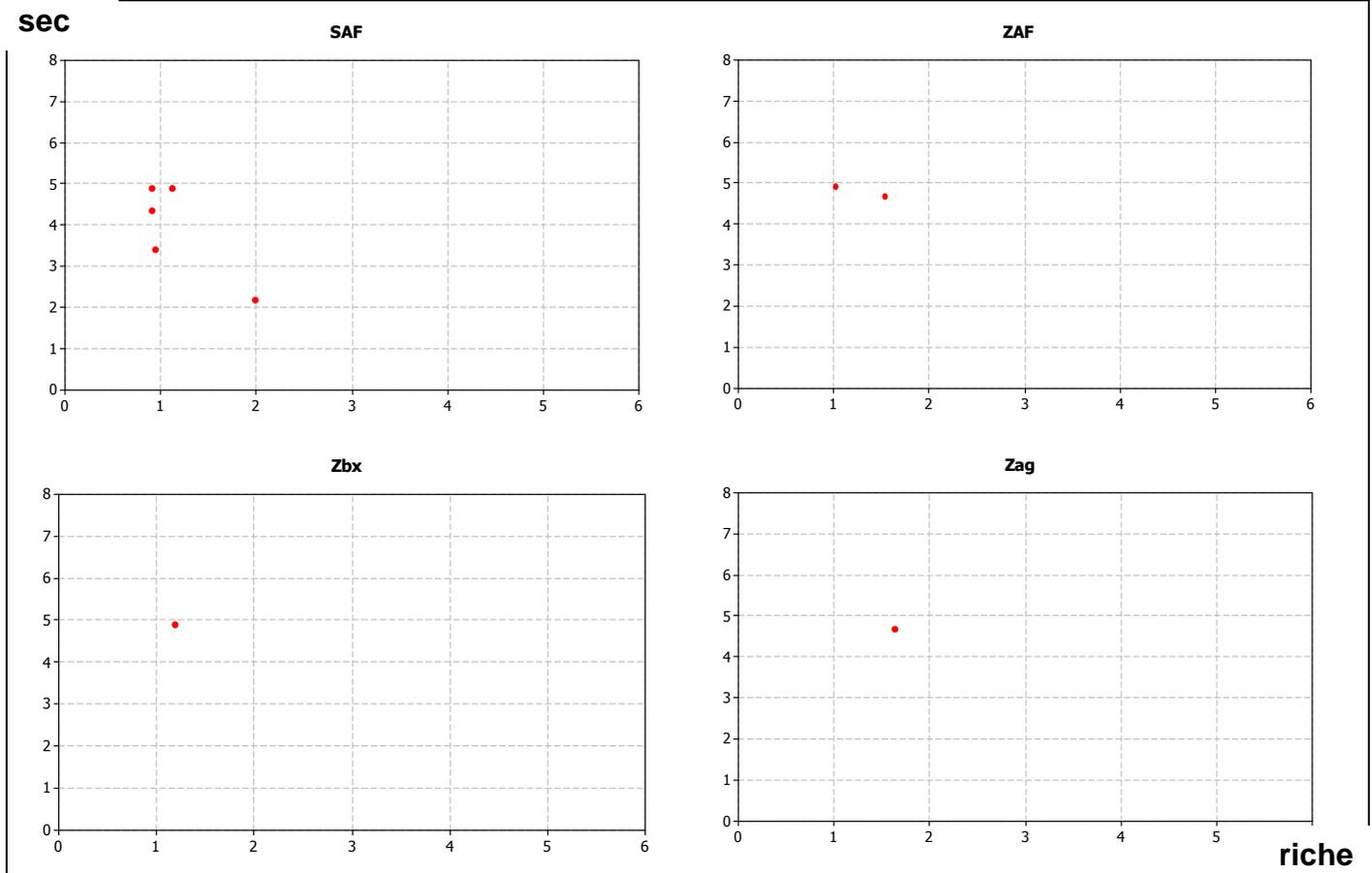
uAbc



Sbf



riche



Au vu du travail d'expertise réalisé relevé par relevé et après analyse des écogrammes fournis par *ECOFLORE*, un premier regroupement exclusivement sur les types de sol non définitif est effectué (Tableau 28 et Figure 54). Au sein de chacun de ces groupes, les autres variables stationnelles sont étudiées.

Trois grands types de sol sont facilement différenciables :

- Les sols à composantes drainantes (textures sableuses ou caillouteuses) et possédant un drainage excessif.
- Les sols de fonds de vallée, possédant une absence de développement de profil (lettre p), témoignant de colluvions ou alluvions. Ces sols, liés à la topographie sont ensuite différenciables par le drainage, démarrant de *légèrement excessif* jusqu'à *pauvre*, à *horizon réduit*.
- Les sols de plateaux et de versants reprenant les autres types de sols. Une distinction entre ces sols est faite de la manière suivante :
 - 3 subdivisions séparant la transition Aba / Aba(b) / Abc. Les sols Aba(b) se situent à la transition vers les sols de fonds de vallée.
 - Les sols à drainage D, regroupant le drainage naturel modéré (lettre c) et le naturel imparfait (lettre d).
 - Les sols possédant un substrat drainant, sableux ou caillouteux (lettres s et g).
 - Les sols possédant un substrat plus argileux (lettres w et u).
 - Deux groupes de sols se démarquant des autres.

Tableau 28 - Regroupement intermédiaire effectué sur seul base des différents types de sol.

Sables et drainage excessif	
1	Gax, ZAF, Zag, SAF
Fonds de vallée	
2	Acp, Lcp, Adp, Ldp
3	Abp, Lbp
4	Afp
Plateaux, versants	
5	Aba
6	Aba(b)
7	Abc
8	uADc, uLDc, Adc, LDc, gADc
9	sLba, sLbc, sAbc, sAba, gLbc, gLbx, gAbc
10	wAbc, wLba, wLbx, uAbc
11	sAAx, wAAx
12	Sbf, Zbx

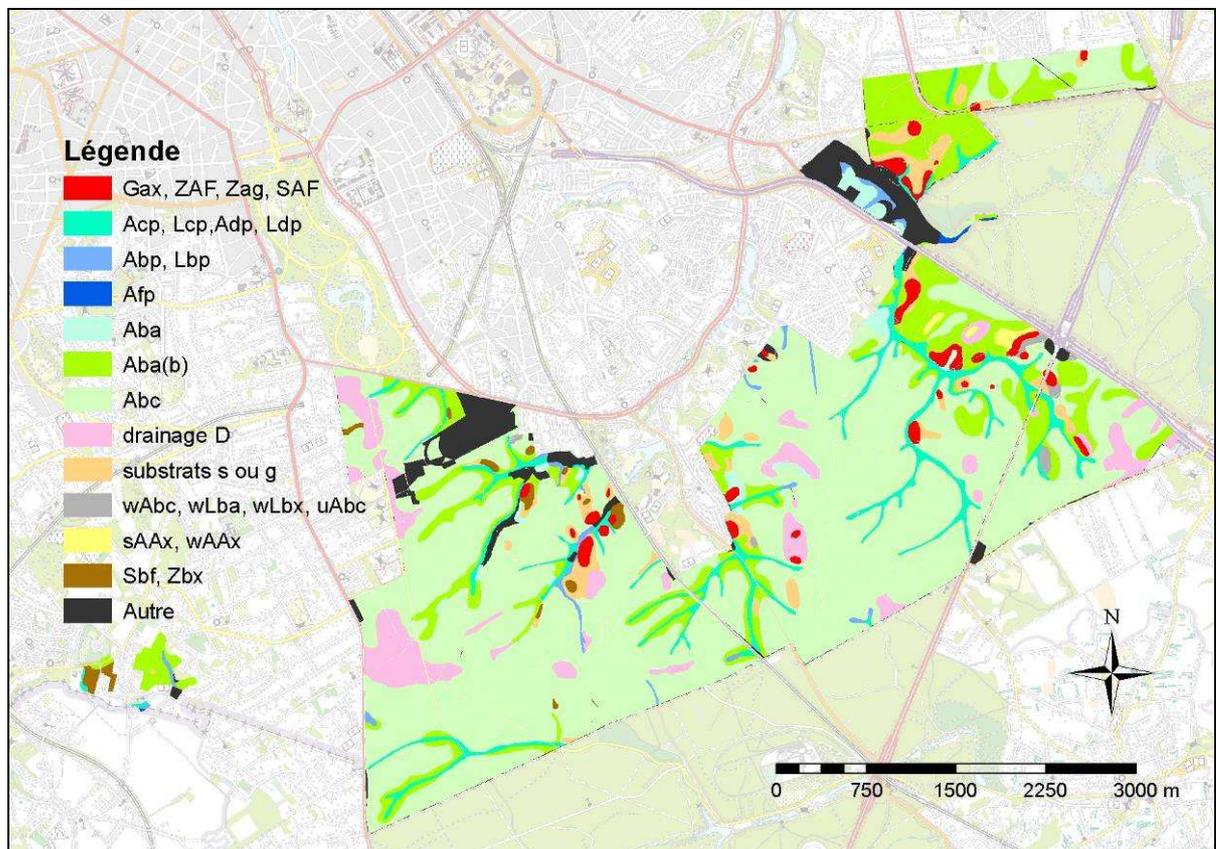


Figure 54 - Cartographie des différents groupes définis uniquement sur critères pédologiques.

Pour la plupart des groupes décrits dans le Tableau 28, les sols concernés représentent de manière satisfaisante la topographie. Les surfaces en jeu pour certains groupes sont faibles (tableau10) et ceux-ci ne se prêtent donc pas à être encore scindés. Cependant, les barycentres des relevés des deux principaux groupes [6 (Aba(b)) et 7 (Abc)] sont dispersés. Ces groupes contiennent donc probablement au minimum deux, voire plusieurs Unités Stationnelles. Les Figure 55, Figure 56 et Figure 57 reprennent, pour chaque groupe, les barycentres ventilés par les variables suivantes :

- type de relief simplifié, tiré de l'estimation qualitative effectuée sur le terrain ;
- pente et concavité, tirées des mesures quantitatives effectuées sur le terrain ;
- géologie, tirée du SIG.

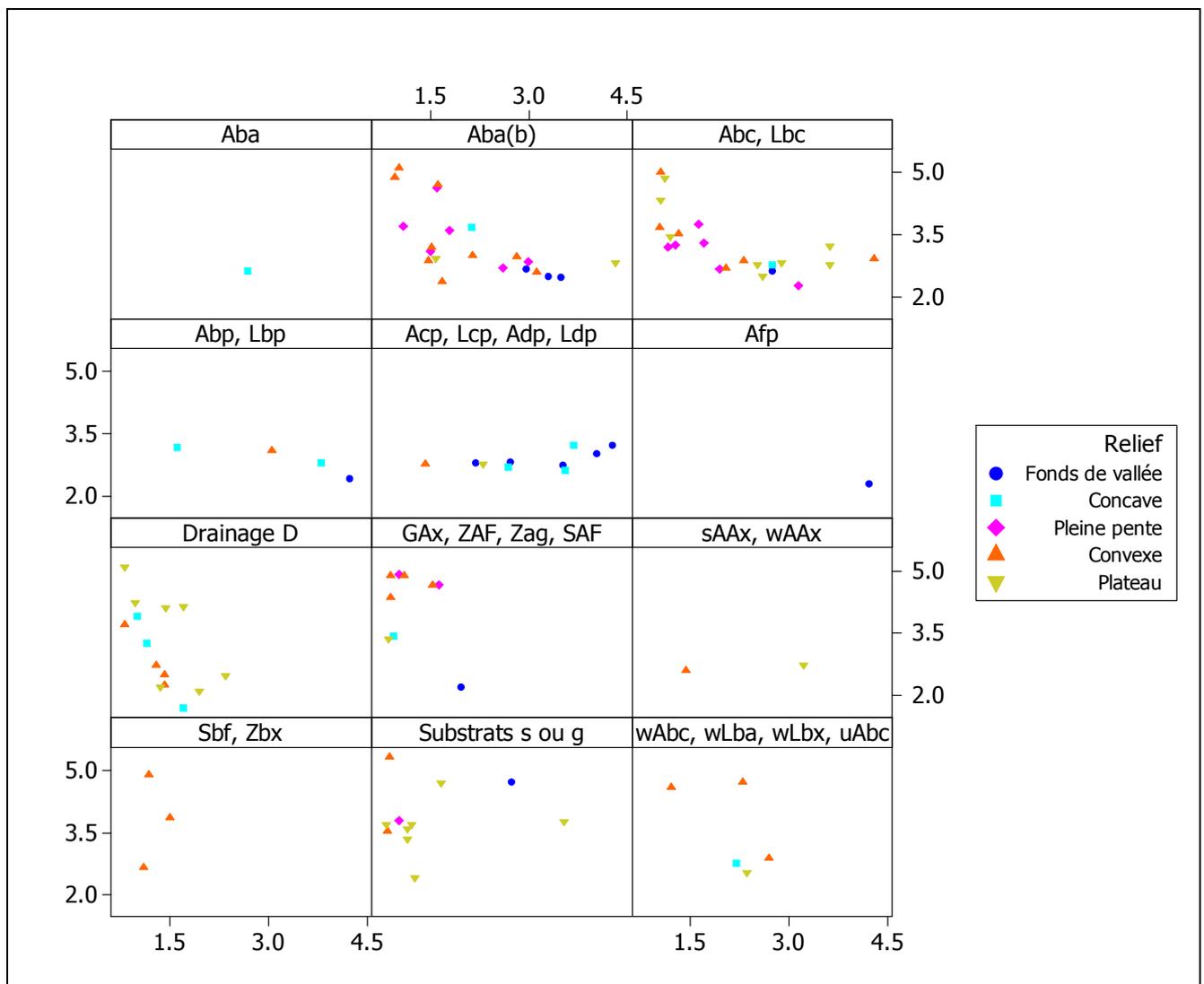


Figure 55 - Barycentres des relevés de végétation pour chaque groupe intermédiaire, ventilés par type de relief (donnée qualitative relevée in situ).

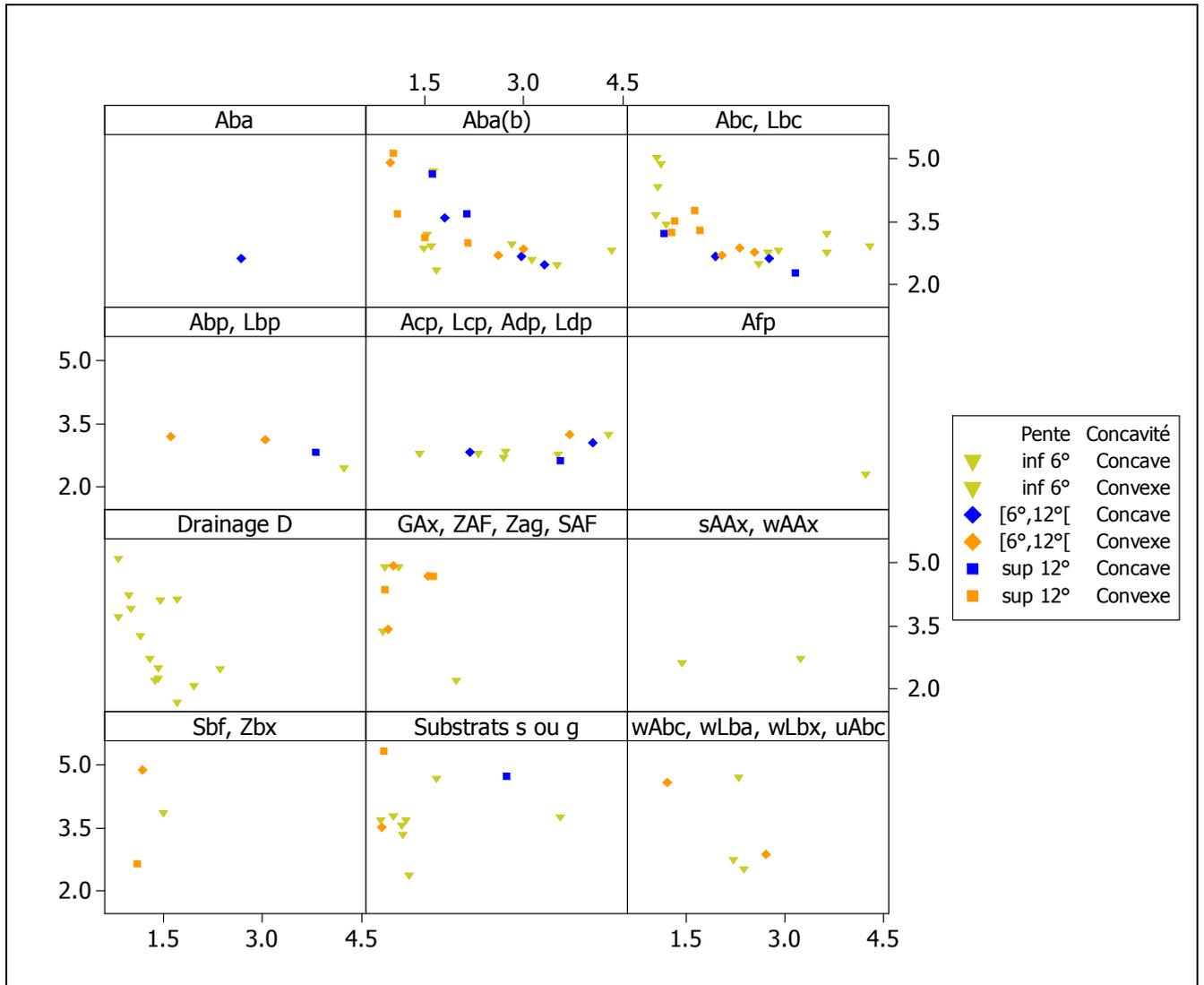


Figure 56 - Barycentres des relevés de végétation pour chaque groupe intermédiaire, ventilés par type de relief (données quantitatives relevées in situ).

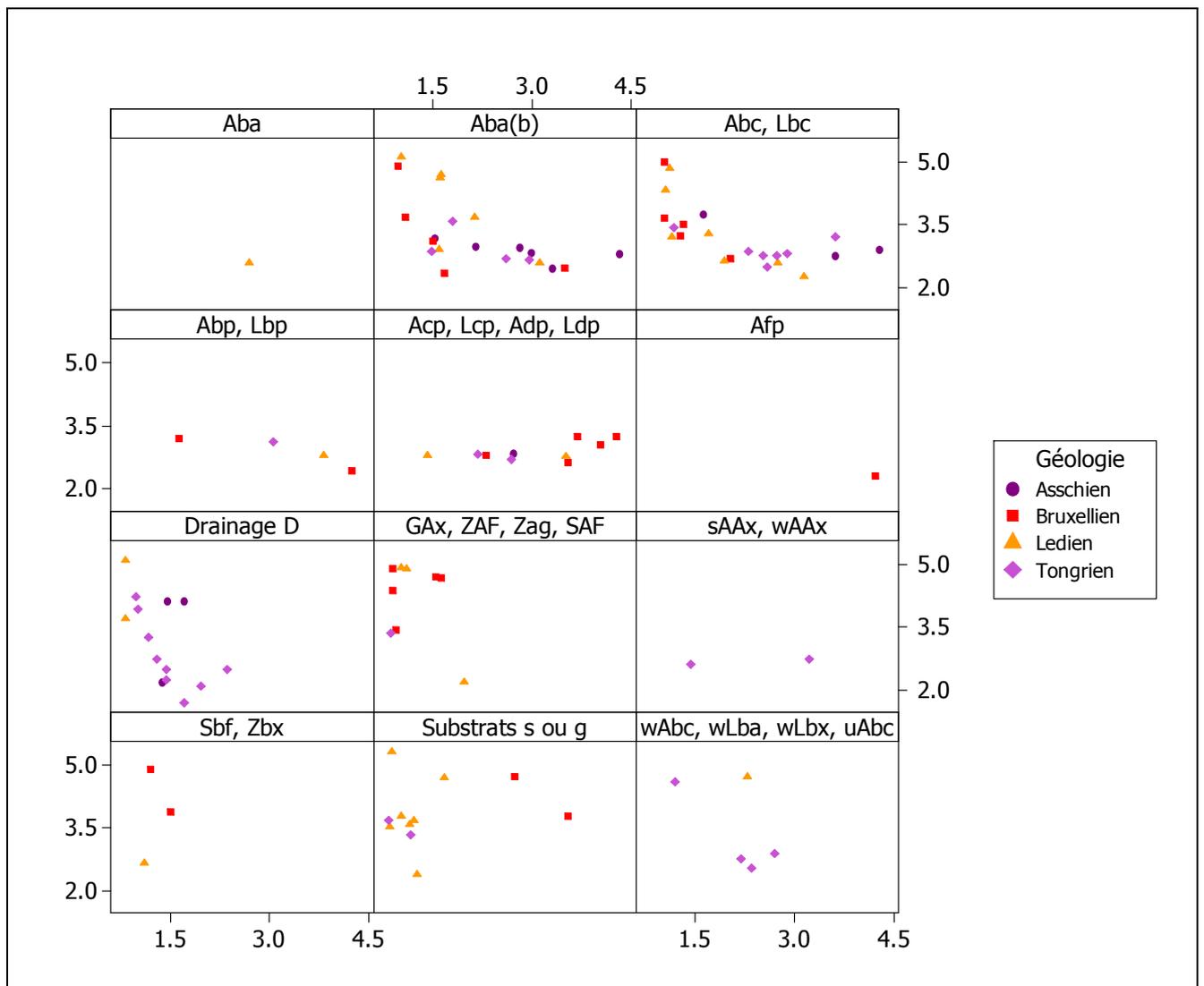


Figure 57 - Barycentres des relevés de végétation pour chaque groupe intermédiaire, ventilés par la géologie (donnée tirée de la carte géologique).

L'analyse visuelle des Figure 55, Figure 56 et Figure 57 confirme globalement la consistance des regroupements effectués. Cependant, pour les sols Abc et Aba(b), la pédologie seule ne peut pas représenter une réalité stationnelle. Leur géologie, ainsi que leur topographie sont variées et doivent également entrer en ligne de compte.

En effet, si l'on observe la Figure 57, deux groupes géologiques s'opposent : d'une part l'Asschien et le Tongrien donnant un mélange d'argile et de sable ; d'autre part le Bruxellien et le Ledien exclusivement sableux. Cela se traduit par une scission des relevés dans l'écogramme : la géologie argilo-sableuse induit une nappe temporaire rendant la station plus fraîche (située en moyenne plus bas dans l'écogramme) que sur substrat exclusivement sableux.

De même, il est possible de distinguer 3 types de relief ayant une incidence sur le niveau hydrique des stations :

- relief de plateau comprenant l'ensemble des pentes inférieures à 6° ;
- relief convexe reprenant les pentes convexes supérieures à 6° ;
- relief concave reprenant les pentes concaves inférieures à 6°.

Cependant, avant de définir les US finales, un dernier facteur lié au sol Aba(b) reste encore à décrypter. En effet, si l'on observe la répartition de ce type de sol (Figure 54), deux tendances spatiales sont à mettre en exergue : d'une part, au Sud de la zone d'étude, ce type de sol est cantonné en position de transition vers des sols de fonds de vallée ; d'autre part, le Nord de la zone, ce sol possède une répartition plus large, particulièrement accentuée au lieu dit du Rouge-Cloître. Plusieurs explications sont à fournir pour expliquer ces différences :

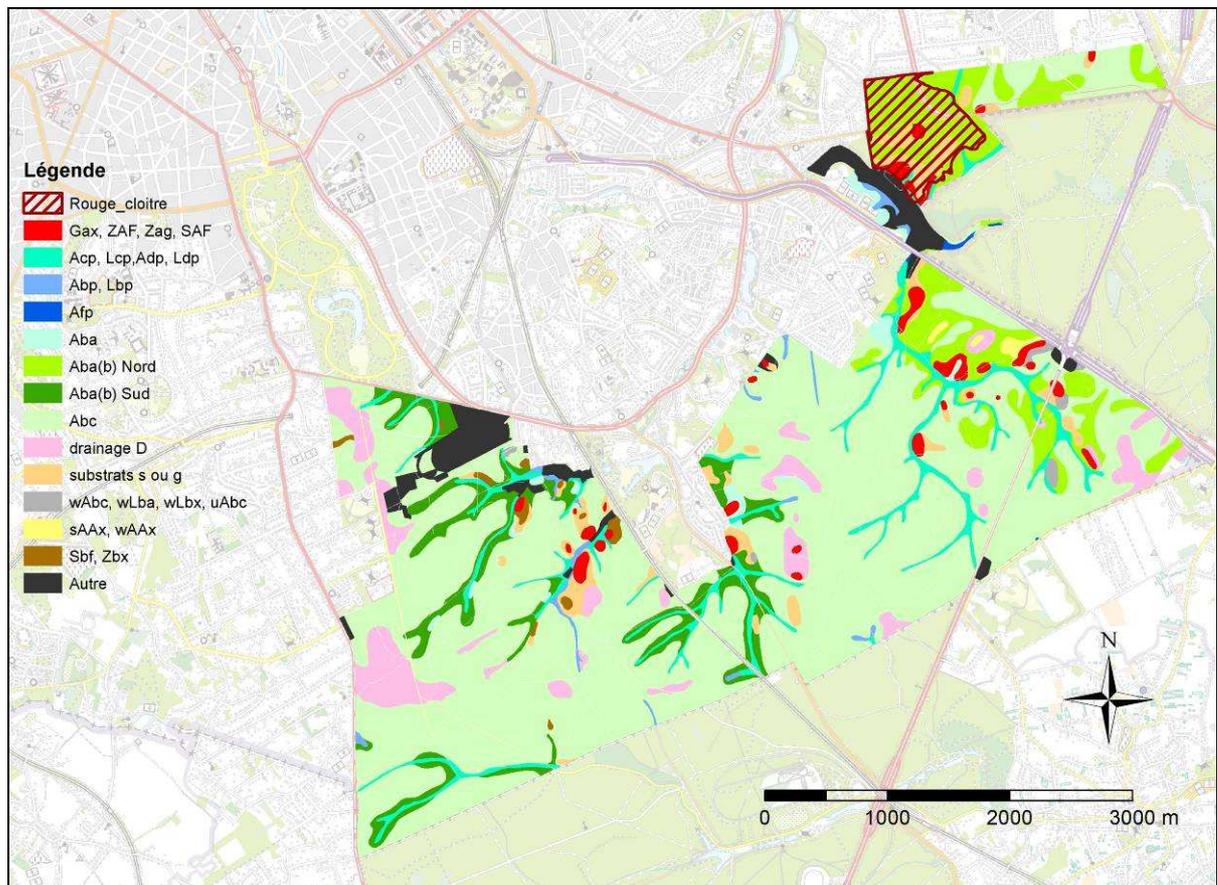


Figure 58 - Situation spatiale de l'aire du Rouge-Cloître ayant subi un sylvopastoralisme ancien

- Premièrement, une zone située au lieu dit du Rouge-Cloître a été sujette à un sylvopastoralisme ancien dégradant le phénomène *Fragipan* à cet endroit. Cette zone est illustrée à la Figure 58. Le sylvopastoralisme exercé précédemment sur cette zone de la forêt de Soignes a permis l'installation d'une pédofaune qui, par son activité, a donc dégradé le *Fragipan* présent sur la zone. Pour ces raisons, les sols de cette zone ont donc été classés parmi les « Aba(b) ».
- Deuxièmement, il reste bien entendu les zones faisant la transition avec les parties concaves du relief, et notamment les sols inféodés en fonds de vallée (développement de profil « p »).

- Et enfin troisièmement, les différents cartographes de la carte des sols de Belgique ont diagnostiqué le sol « Aba(b) » différemment dans le NE, où il est noté par plages, que dans l'ouest, où il a été lié aux zones concaves (Prof Langohr, communication personnelle). En effet, le phénomène de fragipan n'avait pas été clairement décrit à l'époque de cette cartographie.

A la vue des données précédentes, le complexe des sols Abc et Aba(b) reste complexe. Sachant que tous deux « abritent » ce phénomène *Fragipan*, la « conversion » de ces sols en US fera l'objet du Chapitre 4 (après analyse de toutes les données).

Aux informations et sélections déduites de cette section « *phytosociologique* », il reste à vérifier s'il n'est pas possible de dégager une représentation spatiale (en fonction du relief) du phénomène *Fragipan*. Cette question demande d'augmenter le jeu de données pour les sols Abc et Aba(b) par les mesures de compaction effectuées sur une partie de la maille de l'inventaire permanent. Après cette analyse, nous aurons toutes les données en main en vue de la détermination de US finales. Cette détermination sera développée dans la section 3.1.2.

8.1.1.4. Analyse multivariée

Une analyse des correspondances multiples (ACM) a été menée sur le jeu de données écologiques (tableau 31) afin d'identifier des regroupements préférentiels de variables stationnelles ; Le tableau 32 présente la part de la variation du jeu de données prise en compte par les 3 premiers axes factoriels du jeu de l'ACM.

Tableau 29 - Inertie et inertie ajustée des trois premiers axes de l'ACM.

	F1	F2	F3
Valeur propre	0.369	0.312	0.222
Inertie (%)	13.827	11.693	8.324
% cumulé	13.827	25.520	33.843
Inertie ajustée	0.084	0.051	0.016
Inertie ajustée (%)	38.543	23.394	7.137
% cumulé	38.543	61.937	69.074

La contribution de chaque variable écologique à l'axe factoriel est présentée dans le Tableau 30. Plus leur contribution est grande, plus la modalité intervient dans la construction de l'axe en question. Sur base de la répartition des modalités sur un axe, une interprétation de cet axe peut éventuellement être tentée. La Figure 59 illustre la distribution des différentes modalités dans le plan des deux premiers axes de l'ACM qui comportent 62% de l'information du jeu de données. Elle permet de faire ressortir les groupes de variables écologiques qui sont proches.

Tableau 30 - Nombre d'observations (poids), poids relatifs et contributions pour les trois premiers axes de chaque modalité des variables. Données provenant de l'analyse des correspondances multiples.

Modalités		Poids	Poids (relatif)	F1	F2	F3
Substrat non affleurant	SUBSTR_T-SU0	75	0.084	0.003	0.022	0.014
Substrat u ou w	SUBSTR_T-SU1	10	0.011	0.001	0.059	0.135
Substrat s ou g	SUBSTR_T-SU2	14	0.016	0.008	0.020	0.002
Texture A ou L	TEXT_R-TX1	87	0.098	0.021	0.011	0.001
Texture G, S ou Z	TEXT_R-TX2	12	0.013	0.150	0.081	0.006
Drainage a ou A	DRAIN_G-DR1	11	0.012	0.136	0.067	0.013
Drainage b	DRAIN_G-DR2	65	0.073	0.003	0.009	0.080
Drainage c ou d	DRAIN_G-DR3	10	0.011	0.076	0.099	0.041
Drainage D	DRAIN_G-DR4	13	0.015	0.000	0.089	0.122
Profil a	DEVEL_P-DV1	4	0.004	0.002	0.003	0.026
Profil a(b)	DEVEL_P-DV2	20	0.022	0.004	0.000	0.122
Profil c	DEVEL_P-DV3	44	0.049	0.001	0.093	0.015
Profil f, g ou x	DEVEL_P-DV4	16	0.018	0.139	0.060	0.012
Profil p	DEVEL_P-DV5	15	0.017	0.083	0.100	0.026
Tongrien	GEOLOG_E-GE1	29	0.033	0.003	0.022	0.076
Asschien	GEOLOG_E-GE2	13	0.015	0.014	0.003	0.010
Ledien	GEOLOG_E-GE3	32	0.036	0.005	0.003	0.028
Bruxellien	GEOLOG_E-GE4	25	0.028	0.005	0.070	0.001
Humus dysmoder	HUM_S-HS1	56	0.063	0.014	0.000	0.014
Humus eumoder	HUM_S-HS2	35	0.039	0.012	0.000	0.032
Humus hemimoder, dysmull ou oligomull	HUM_S-HS3	8	0.009	0.007	0.000	0.004
Niveau hydrique h	LUZ_Y-LY2	45	0.051	0.035	0.001	0.004
Niveau hydrique f	LUZ_Y-LY3	31	0.035	0.000	0.000	0.018
niveau hydrique m	LUZ_Y-LY4	23	0.026	0.065	0.001	0.005
Niveau trophique AA	LUZ_X-LX1	11	0.012	0.052	0.000	0.035
Niveau trophique A	LUZ_X-LX2	48	0.054	0.020	0.016	0.018
Niveau trophique aa	LUZ_X-LX3	21	0.024	0.031	0.001	0.015
Niveau trophique a	LUZ_X-LX4	14	0.016	0.021	0.009	0.005
Niveau trophique n	LUZ_X-LX5	5	0.006	0.028	0.028	0.000
Relief concave	REL_EF-RE1	19	0.021	0.045	0.091	0.010
Relief pleine pente	REL_EF-RE2	18	0.020	0.002	0.003	0.093
Relief convexe	REL_EF-RE3	17	0.019	0.016	0.002	0.000
Relief plateau	REL_EF-RE4	45	0.051	0.001	0.035	0.017

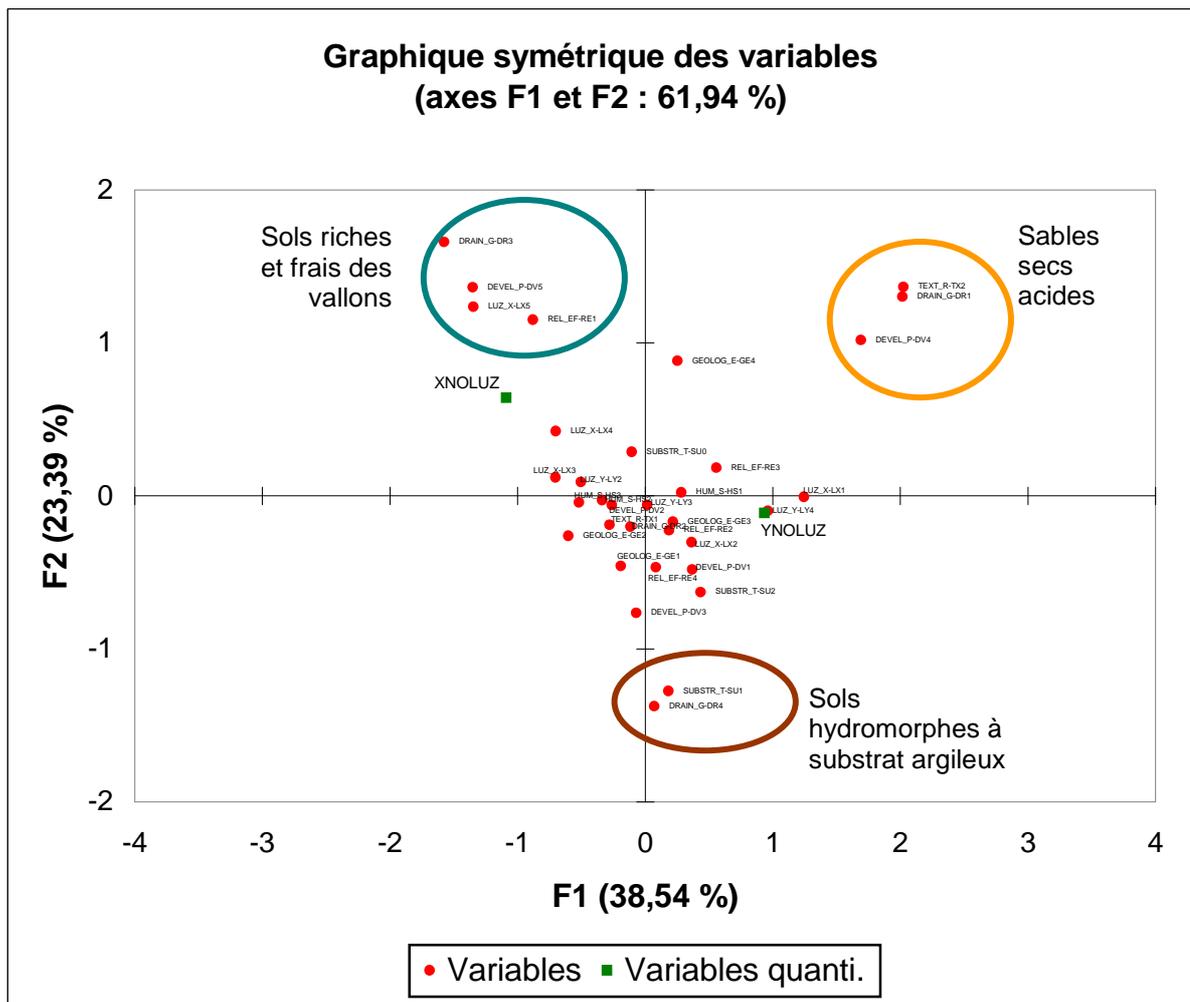


Figure 59 - Répartition des modalités issues des différentes variables qualitatives sur les deux premiers axes de l'ACM. Les niveaux hydriques et trophiques sous forme quantitative ont également été projetés sur le graphe. Ces derniers n'ont pas participé au calcul statistique de l'ACM.

A la lecture de ce graphique, on distingue 3 pôles :

- Le niveau trophique le plus riche (neutre) est associé à aux drainages c ou d (modéré à imparfait), à un développement de profil p (alluvions, colluvions) et à un relief concave ;
- Les textures G, S ou Z (sableux ou caillouteux) sont associées au drainage a (excessif) et au développement de profil f, g ou x. Le niveau trophique se rapprochant le plus de cette configuration est le AA (très acide). Le niveau hydrique se rapprochant le plus de cette configuration est le m (mésophile).
- Le drainage D et les substrats argileux représentent une situation particulière ;

Ainsi qu'un ensemble peu différencié de stations comprenant notamment tous les limons non hydromorphes, type dominant de la forêt de Soignes.

L'analyse multivariée va dans le sens de l'analyse empirique réalisées par type de sol : importance d'isoler les sols à drainage D comme situation à part, les milieux colluvionnés (développement de profil p) et les sols à texture sableuse.

Cette analyse statistique vient donc en confirmation et argumentation des regroupements pédologiques effectués par expertise. Elle n'apporte toutefois pas d'indication nette sur l'intérêt d'envisager des divisions au sein du grand groupe des stations de plateau.

8.1.2. Campagnes secondaires

8.1.2.1. *Mise en place de l'inventaire forestier permanent*

Le jeu de données grossi par les unités d'échantillonnage relevées sur l'inventaire permanent est analysé en vue d'éventuellement dégager une relation entre la profondeur du *Fragipan* et le relief. En effet, du point de vue théorique, les zones concaves de bas de versants ont bénéficié par le passé d'un dépôt limoneux plus important. Donc, la profondeur d'apparition du *Fragipan* devrait vraisemblablement être plus grande en zone concave et plus affleurante pour les zones convexes et les plateaux. Les Figure 60 et Figure 61 illustrent les résultats de cette comparaison pour les sols Abc et Aba(b), ainsi que pour le relief simplifié tiré de la description qualitative effectuée sur le terrain. Les données utilisées concernent les unités d'échantillonnage ayant un N1 (N1 : force déployée pour traverser la couche compactée) supérieur à 400 Newton, que l'on peut considérer comme caractéristique du fragipan (figure 44)

A l'analyse visuelle de ces graphes, on observe une tendance qui confirme l'hypothèse décrite ci-dessus ; toutefois les différences de profondeur ne sont pas immenses, de sorte que le problème de fragipan reste entier dans tous les types de station. Du point de vue statistique, l'analyse de la variance et le test d'égalité des moyennes ne permet en aucune manière d'affirmer une différence significative au niveau généralement pris en compte ($\alpha = 0,05$) en fonction du relief.

Au sein des sols sensibles (limons des pentes et plateaux), on ne peut donc affirmer de différenciation nette de la profondeur de fragipan selon la position topographique ou le développement de profil. Il n'est pas possible non plus d'élaborer un modèle prédictif du fragipan.

Le phénomène Fragipan n'est donc pas cartographiable en dépit des informations en notre possession. Il faudra prendre en compte ce phénomène de manière égale sur l'ensemble des zones sur sols à textures limoneuses et à développement de profil a(b) ou c. A cette conclusion, nous retirerons les sols Aba(b) se situant dans la zone du Rouge-Cloître ayant subi un sylvopastoralisme.

Toutefois, sur les 10 sondages effectués, en moyenne 1 à 2 n'ont pas présenté de résistance significative à la pénétration de la sonde, ce qui confirme l'hypothèses de discontinuités très locales dans le fragipan, qui permettent à des racines de s'enfoncer sous le fragipan et de bénéficier, au moins dans le jeune âge, d'un certain ancrage et d'une alimentation minérale et hydrique optimale. Une discussion plus approfondie est disponible en annexe.

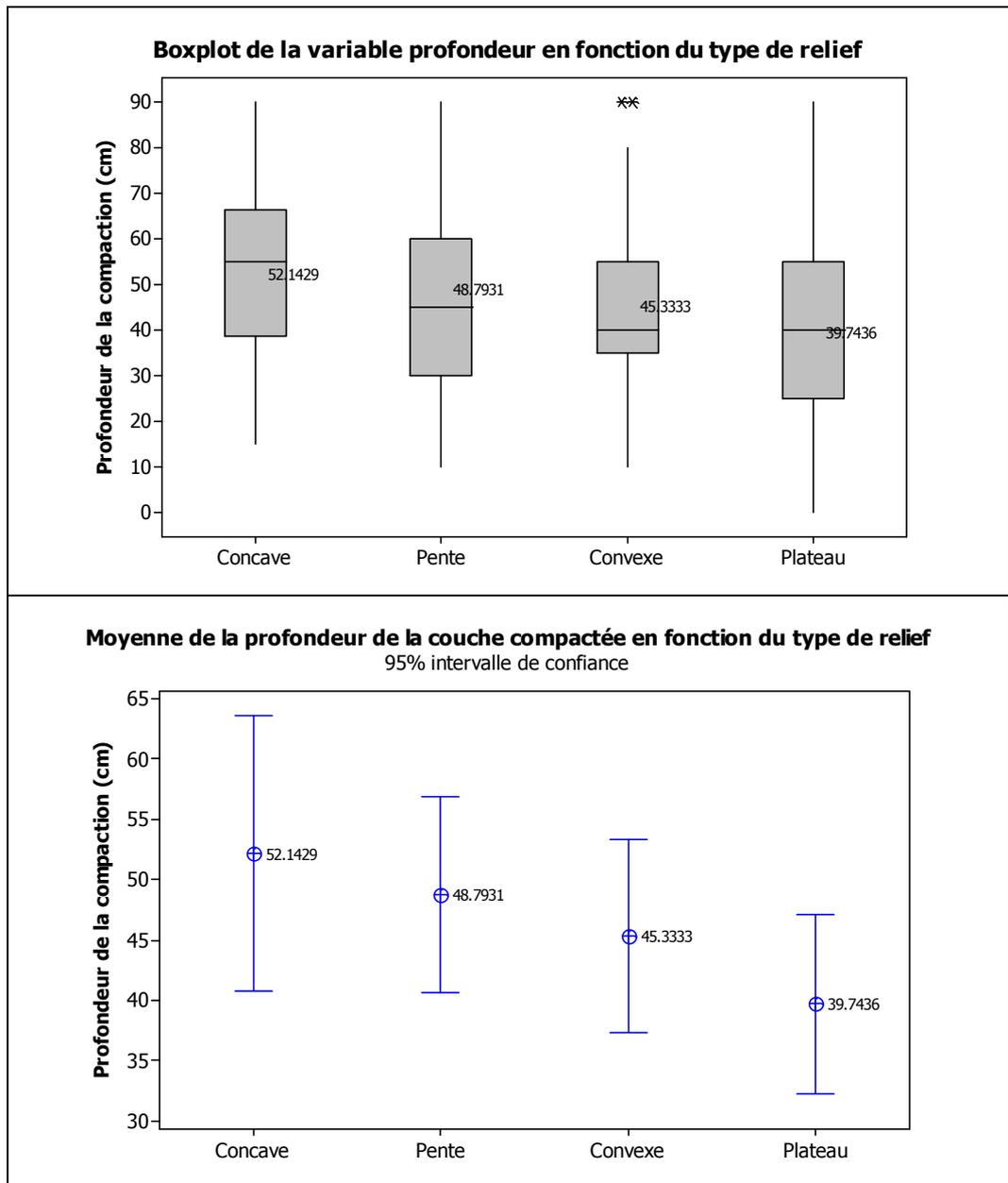


Figure 60 - Représentations Boxplots (en haut) et intervalles de confiance (en bas) de la profondeur d'apparition du *Fragipan* en fonction du type de relief, et ce pour les sols Abc et Aba(b) confondus. Les chiffres accompagnant les Boxplots représentent la moyenne, et non la médiane comme l'exprime la barre centrale de la boîte.

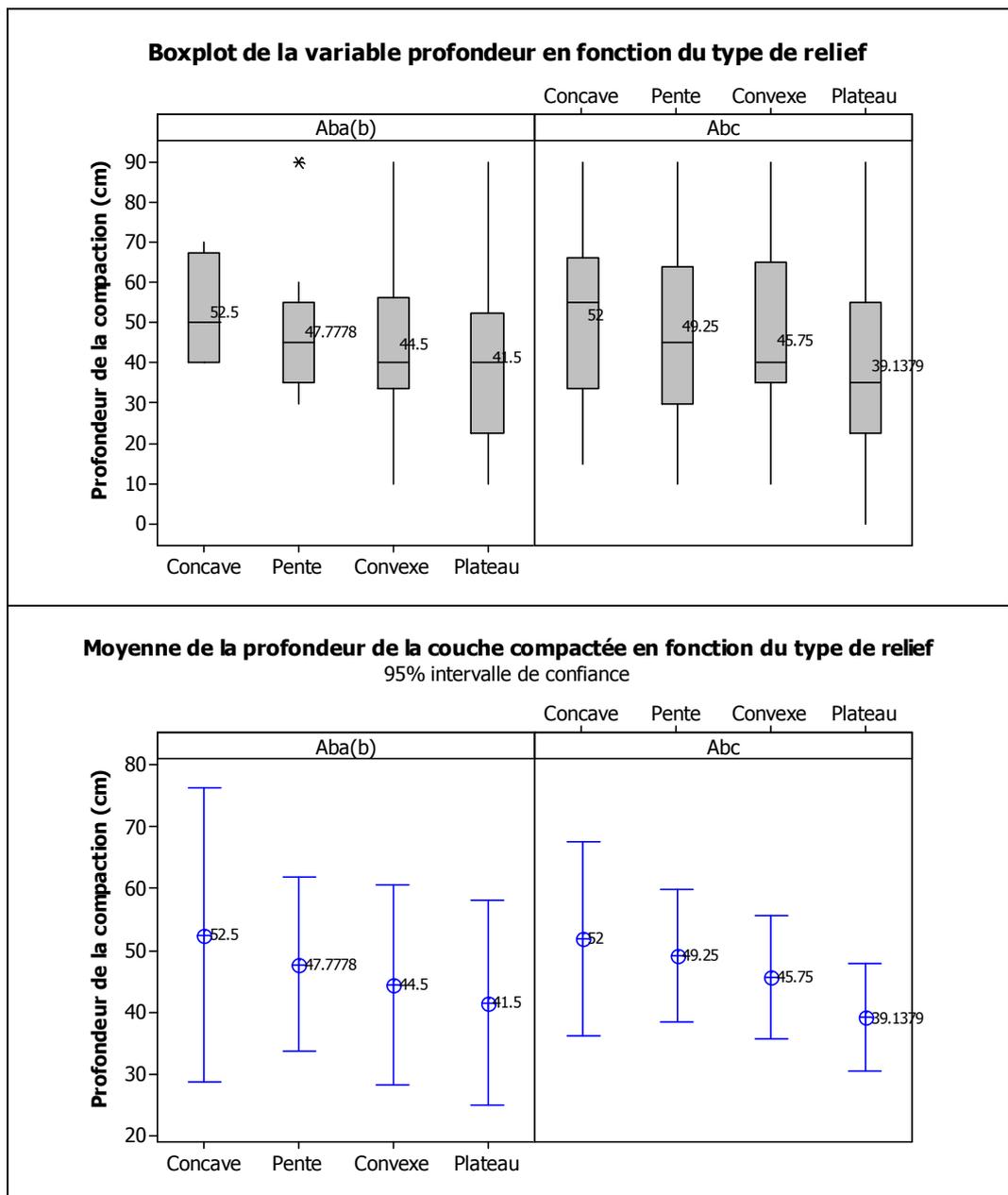
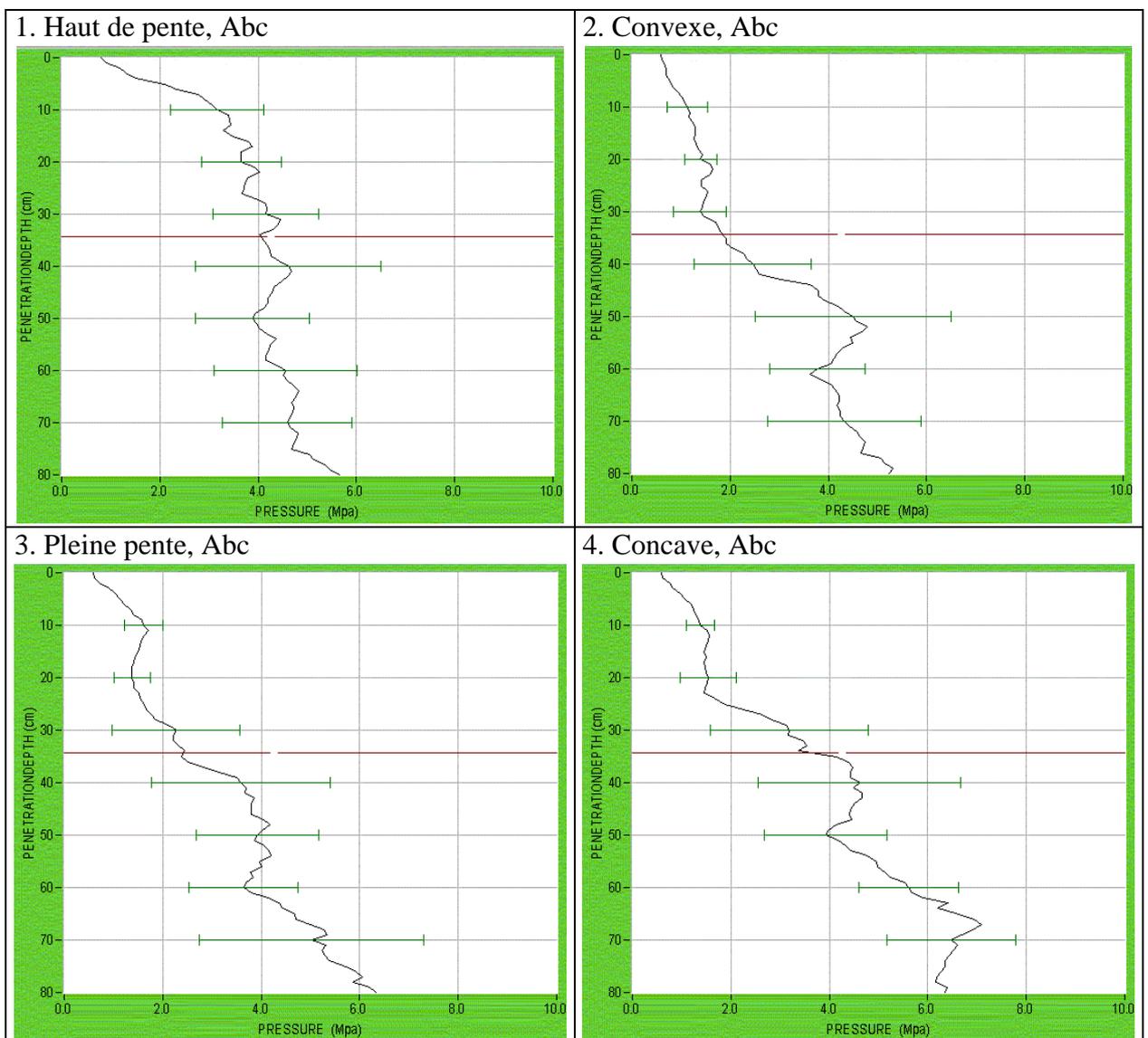


Figure 61 - Représentations Boxplots (en haut) et intervalles de confiance (en bas) de la profondeur d'apparition du *Fragipan* en fonction du type de relief, et ce pour les sols Abc et Aba(b). Les chiffres accompagnant les Boxplots représentent la moyenne, et non la médiane comme l'exprime la barre centrale de la boîte.

8.1.2.2. Réalisation d'un transect avec pénétromètre électronique

Les résultats associés au transect effectué en vue de caractériser la profondeur de compaction en fonction de la position sur le versant sont consultables à la Figure 62. Les écarts-types démontrent une forte hétérogénéité dans les mesures. Cette hétérogénéité peut provenir soit du sol lui-même, soit du fait que la compaction est détectée à des profondeurs différentes par l'appareil. Sur l'ensemble des mesures, nous préconisons donc de ne sélectionner que les courbes majoritairement semblables. Même si l'on effectue cette opération, ce transect ne permet pas d'émettre de conclusion quant à une corrélation entre la situation sur le versant et la profondeur de la compaction. Vu la lourdeur des mesures, cette méthode a été abandonnée au profit d'un pénétromètre non électronique. Cette méthode a cependant servi à la définition des mesures à noter lors de chaque pénétration (voir section 7.3.1.2.1): P1, N1, Delta, P2, N2.



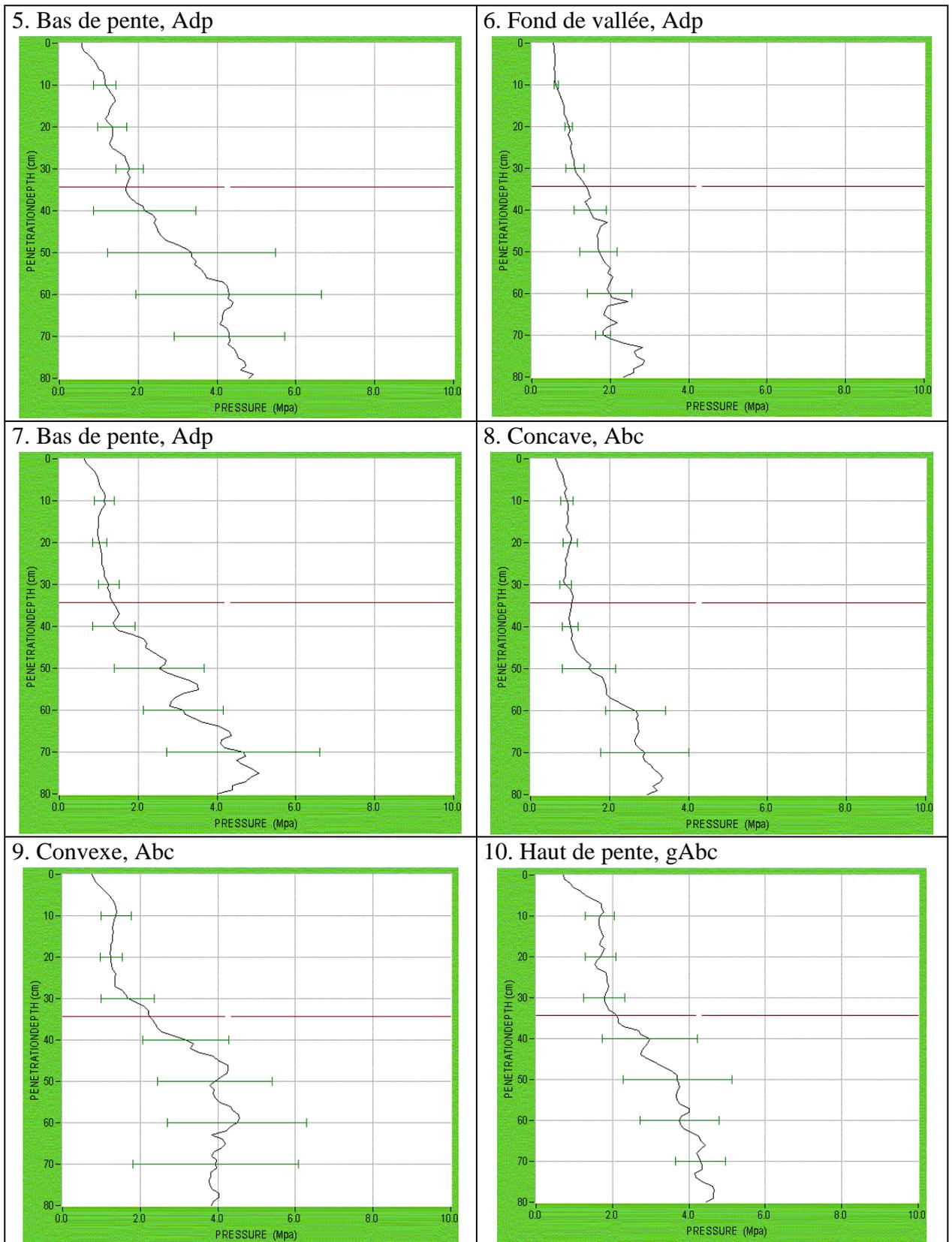


Figure 62 - Résultats obtenus par le pénétromètre électronique. En ordonnée, la profondeur de sondage. En abscisse, la pression exercée sur le pénétromètre. La courbe représente la moyenne des dix mesures effectuées par unité d'échantillonnage, les écarts-types autour de cette courbe sont donnés tous les 10 cm de profondeur.

Chapitre 9. Catalogue des stations

9.1. Détermination des US finales

En synthèse, les facteurs en jeu dans la détermination finale des US sont les suivants :

- Type de sol : regroupement par type de sol.
- Géologie : par son influence sur le régime hydrique du sol (fréquente présence d'une éventuelle nappe temporaire perchée) ;
- Relief : par l'influence de la topographie sur les flux d'eau dans le sol et l'exposition au rayonnement solaire ;
- *Fragipan* : présence/absence du phénomène, avec une éventuelle influence anthropique.

La division en unités stationnelles proposée au tableau 31 a été retenue. Toutefois, l'analyse a montré que la distinction entre les unités 6 et 7 de cette division (Aba(b) et Abc) n'a pas un sens univoque (figure 59). Il a donc été choisi de distinguer les sols de type Aba(b) de la manière suivante :

- Les sols Aba(b) de la Zone Sud (en vert foncé) sont considérés comme sols de transition avec les sols de fonds de vallée. Ils sont versés dans les US 9 et 13 (concaves) se différenciant par leur géologie.
- Pour la zone Nord (en vert plus clair), trois distinctions sont à faire :
 - La zone du Rouge-Cloître ayant subi une dégradation du *Fragipan*. L'Aba(b) de cette zone est versée dans l'US 5 avec le type de sol Aba.
 - Les autres zones se situant à moins de 50 mètres d'un sol de fonds de vallée (fonction *Buffer* dans ArcGis) sont versés dans les US concaves 9 et 13 en fonction de la géologie sous-jacente.
 - Les autres zones sont à considérer comme le sol Abc et peuvent être dans les US 6 à 13 en fonction de la géologie et de la topographie.

Point de vue de la géologie, deux types sont à opposer :

- **Bruxellien et Lédien** : une géologie sableuse, plus filtrante, absence de nappe temporaire et situation plus sèche en fonction de l'affleurement de cette géologie.
- **Asschien et Tongrien** : une géologie argilo-sableuse occasionnant la présence d'une nappe temporaire en hiver. La station est donc plus humide en fonction de l'affleurement de cette couche.

Point de vue topographie, toutes les pentes inférieures à 6° sont à verser dans la catégorie plateaux (US 6 et 10). Pour les pentes supérieures, ce qui apparaît en zone concave avec le traitement ArcGis et Ilwis sont reverser dans les US 9 et 13. Les autres, considérées comme pentes véritables, sont discriminées en fonction du sous-secteur chaud ou froid (comme décrit dans la méthodologie) et sont versées dans les US 7, 8, 11 et 12.

Au total, la procédure de sélection est reprise dans le Tableau 31. D'un point de vue cartographique, la Figure 63 reprend l'ensemble des US.

Tableau 31 - Détermination finale des Unités Stationnelles

Sol	Géologie	Relief	Exposition	US
GAX, ZAF, Zag, SAF				01
Acp, Lcp, Adp, Ldp				02
Abp, Lbp				03
Afp				04
Aba + Aba(b) du Rouge-Cloître				05
Abc, Aba(b)	Bruxelien, Ledien	plateau		06
		pente	froide	07
			chaude	08
	concave		09	
	Asschien, Tongrien	plateau		10
		pente	froide	11
			chaude	12
		concave		13
	uADc, uLDc, ADc, LDc, gADc			
sLba, sLbc, sAbc, sAba, gLbc, gLbx, gAbc				15
wAbc, xLba, wLbx, uAbc				16
sAAx, wAAx				17
Sbf, Zbx				18

Si l'on reprend la même démarche qu'exposée dans le traitement des résultats, une analyse de la variance (logiciel MINITAB) est possible en faisant réagir le niveau trophique ou hydrique des relevés phytosociologiques (calculés par ECOFLORE) en fonction des US finales. Les résultats de l'AV1 sont illustrés aux Figure 64 et Figure 65.

Les zones en grisé de ces deux figures témoignent d'un faible effectif de relevés phytosociologiques, les conditions d'application de l'analyse ne sont donc pas respectées pour ces classes. Cependant, sur les deux figures, nous pouvons valider les groupements/subdivisions effectués car l'ordre croissant d'observations de ces deux échelles respecte l'expertise réalisée sur ces US.

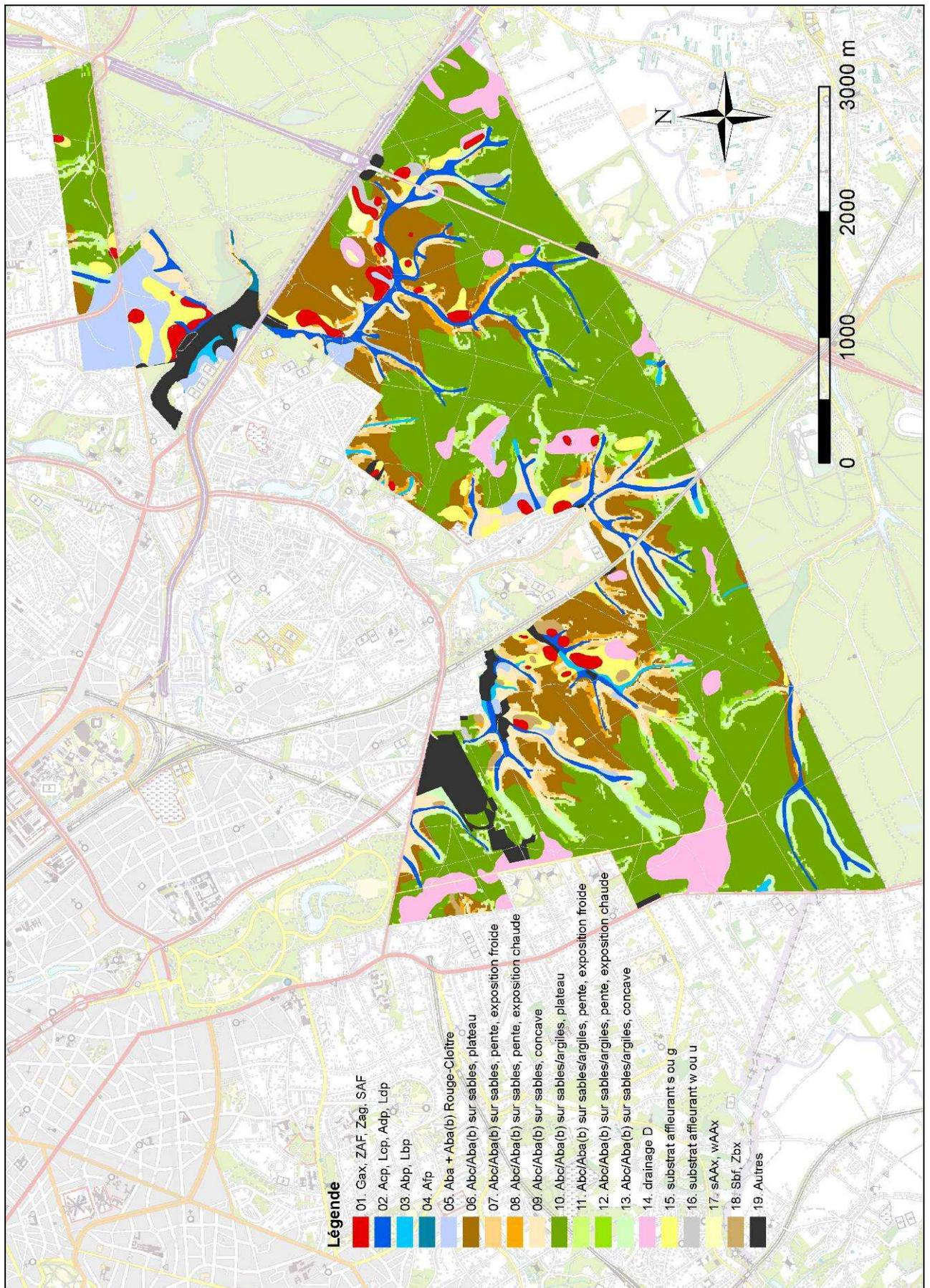


Figure 63 - Cartographie des 18 Unités Stationnelles finales.

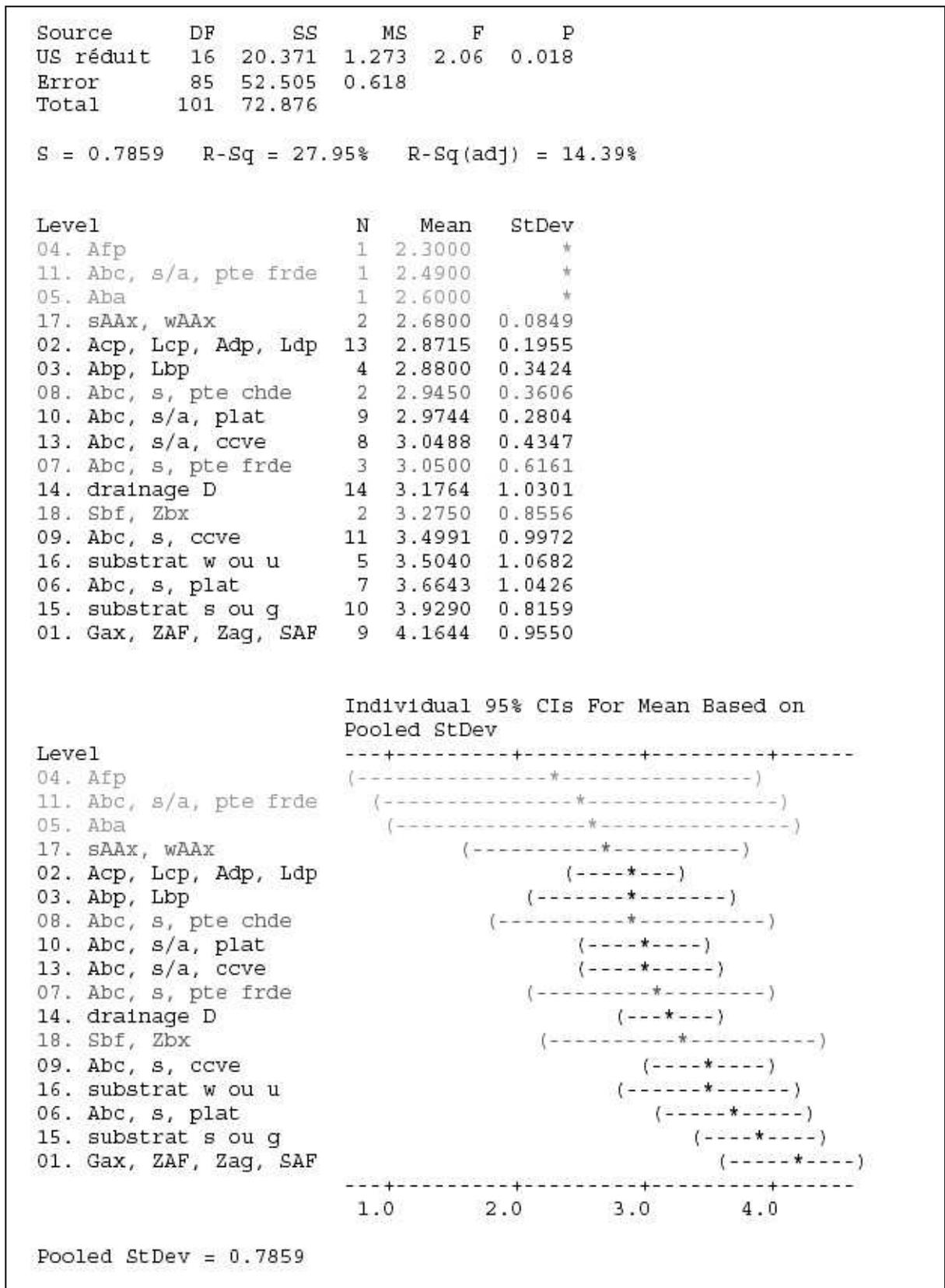


Figure 64 - Résultats de l'AV1 considérant le niveau hydrique (axe des ordonnées) des relevés phytosociologiques en fonction des US finales.

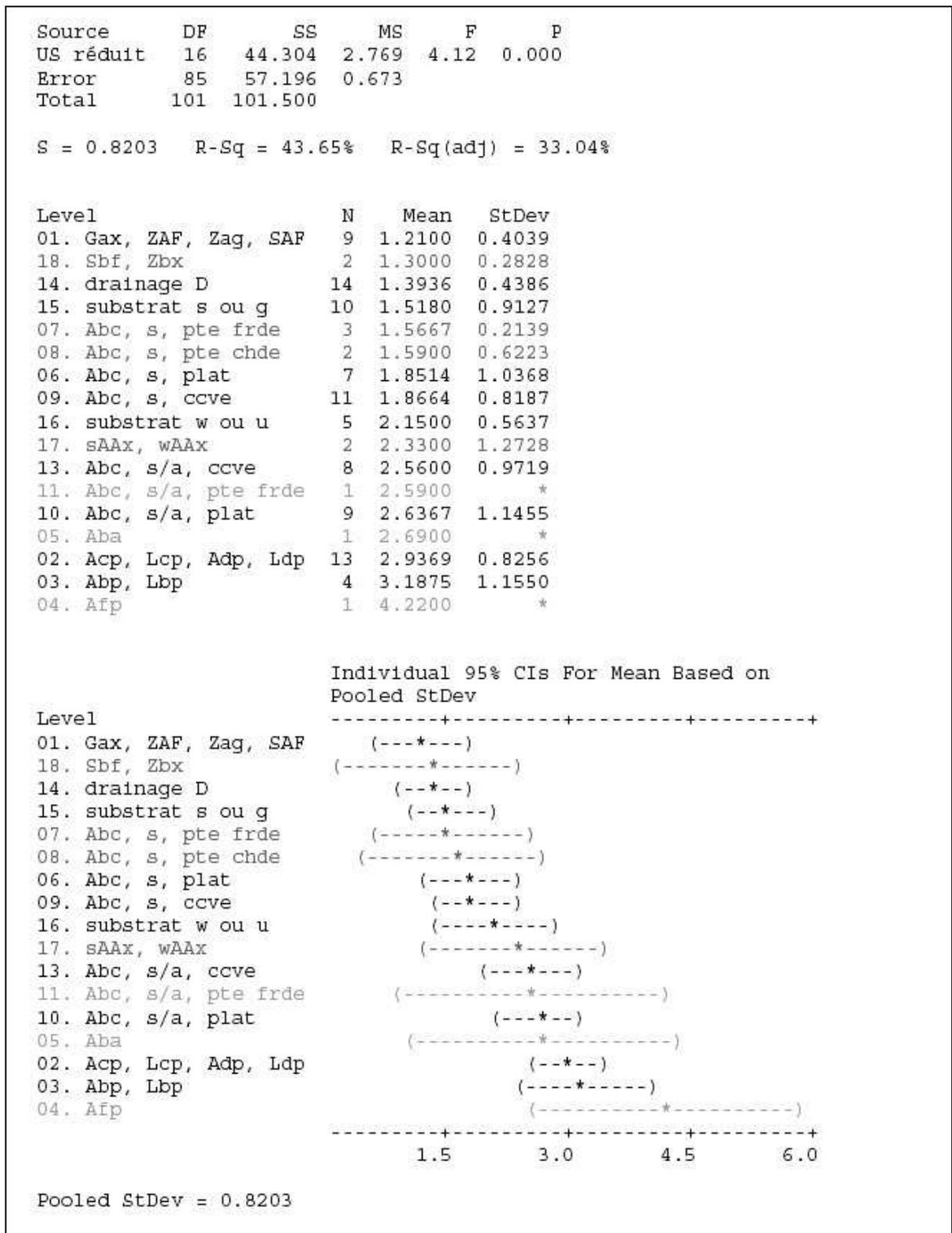


Figure 65 - Résultats de l'AV1 considérant le niveau trophique (axe des abscisses) des relevés phytosociologiques en fonction des US finales.

9.2. Développement technique du catalogue

La procédure de sélection étant réalisée sur les US, le pas de la vulgarisation est à franchir afin de répondre à l'objectif de réalisation d'un catalogue des stations. Pourquoi ce guide « catalogue des stations » ?

L'objectif principal de ce guide est d'aider les gestionnaires et techniciens forestiers de la zone d'étude à établir un diagnostic des conditions écologiques (variant selon différents facteurs) existant sur une parcelle donnée du massif de la forêt de Soignes et d'en déduire les potentialités sylvicoles et les sensibilités de leurs stations.

En ce sens, ce catalogue reprendra les différentes Unités Stationnelles présentes sur la zone d'étude. Par Unité Stationnelle, il faut entendre l'étendue de terrain (de superficie variable) homogène dans ses conditions stationnelles physiques (climat, topographie, sol, géologie) et biologiques (composition floristique, caractères indicateurs de la flore, associations phytosociologiques potentielles mais pas « peuplement »). Toutes ces caractéristiques font l'objet de rubriques.

Enfin, après avoir mis en évidence pour le gestionnaire les caractéristiques pertinentes de ces stations forestières, il s'agira de déterminer comment les changements climatiques que l'on prédit pour la fin du millénaire vont influencer le faciès de la végétation en place.

Ce catalogue comportera donc trois parties :

- Un premier volet explicatif reprendra la clef de détermination des Unités Stationnelles. Elle s'attellera également à expliquer les rubriques développées dans les fiches techniques des US ;
- La deuxième partie présentera les US une par une, sous forme d'une fiche synthétique. Chaque fiche comporte 4 pages: 2 pages descriptives de la station, 1 page abordant les changements climatiques et 1 page (encore à développer) concernant les aspects gestionnels de ces US.
- Enfin, la troisième et dernière partie reprendra une approche essence par essence en intégrant les conclusions sylvicoles par rapport aux changements climatiques. Une cartographie des potentialités actuelles et futures sera développée.

Le catalogue, pour des raisons de mises en page, a été réalisé sous le logiciel PUBLISHER. En voici la disposition pour l'US 1 :

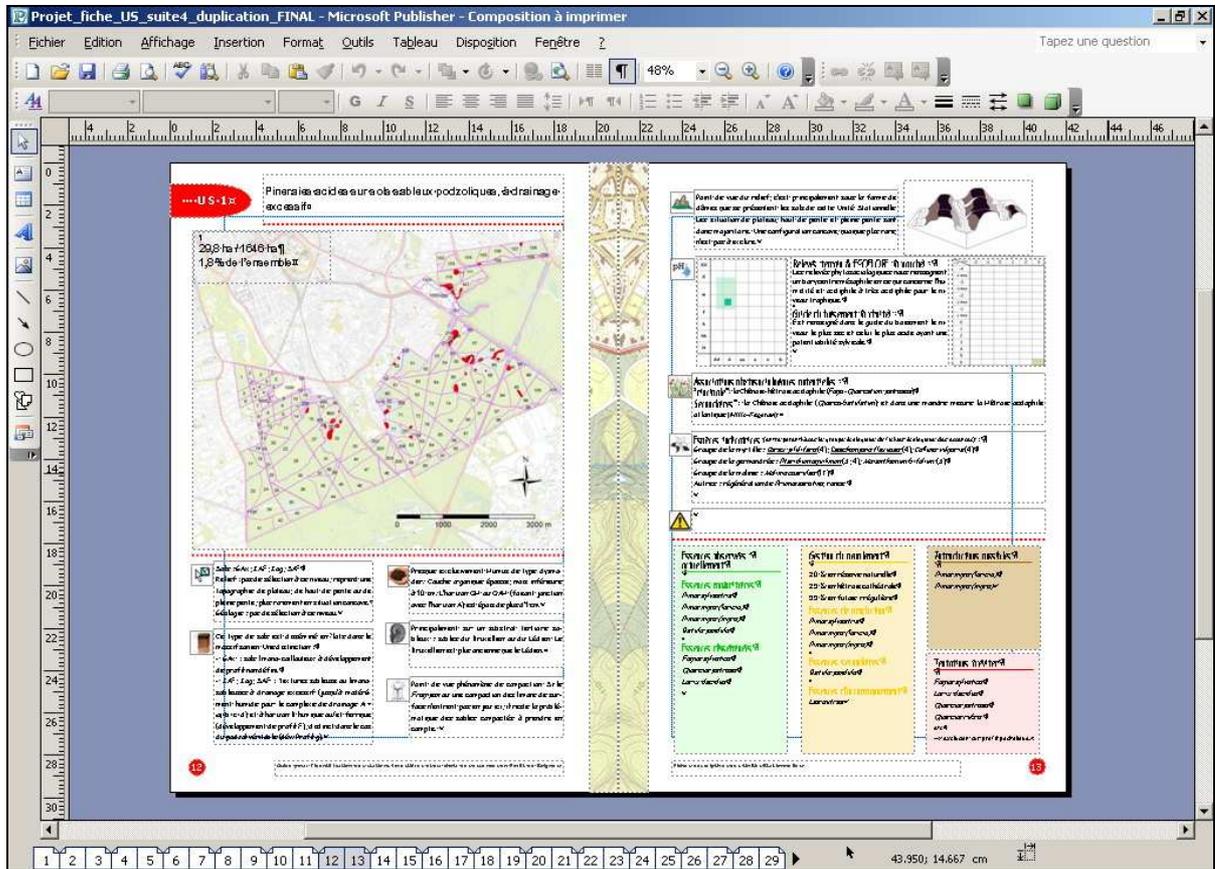


Figure 66 - réalisation du catalogue des stations sous le logiciel PUBLISHER

Les deux premières pages reprennent les rubriques classiques (Figure 67 et Figure 68) : procédure de sélection, pédologie, humus, géologie, phénomènes de compaction, relief, écogrammes, associations phytosociologiques potentielles, espèces indicatrices, essences observées actuellement, gestion actuelle des peuplements, introduction d'essences possibles, tentation d'introduction à éviter.

Les troisième et quatrième pages reprennent l'imbrication du volet « Réchauffement Climatique ». Ce volet est détaillé dans le chapitre suivant.

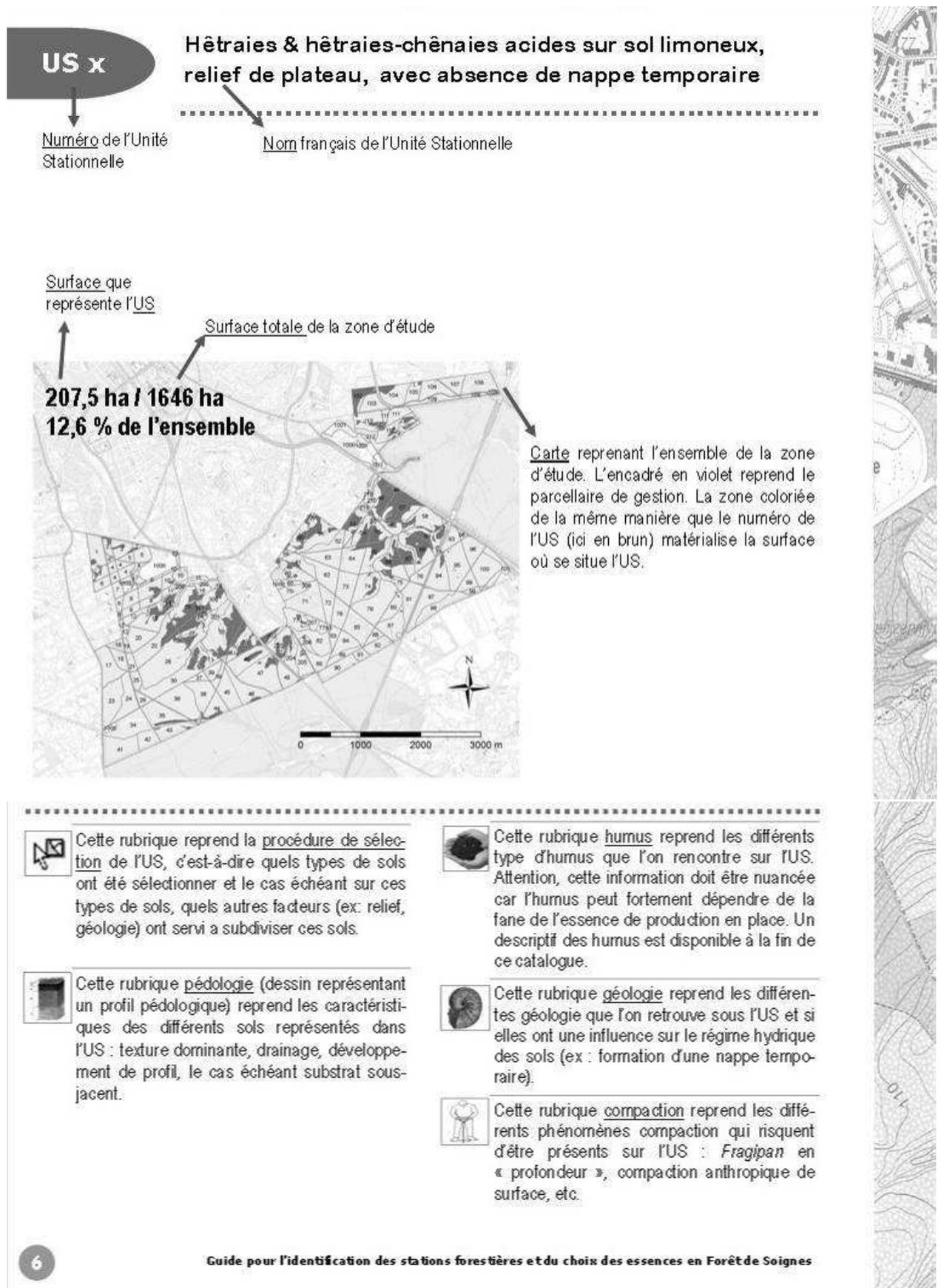
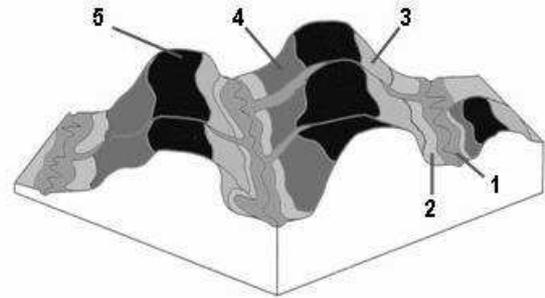


Figure 67 - Description des rubriques de la première page de la fiche



Cette rubrique relief reprend les topographies que l'on peut rencontrer sur l'US. Plusieurs peuvent être sélectionnées.

- 1 : fonds de vallées véritables
- 2 : relief concave
- 3 : pente > 6°, versants froids
- 4 : pente > 6°, versants chauds
- 5 : plateaux



xx							
x							
m							
f							
h							
hh							
H							
	AA	A	aa	a	n	b	

A gauche : Ecogramme (échelle trophique en abscisse, échelle hydrique en ordonnée) déduit de relevés phytosociologiques effectués sur l'US et traités dans le logiciel ECOFLORE (reprenant le caractère indicateur de la Flore Forestière Française).

A droite : Ecogramme tiré du Guide du Boisement en fonction des types de sols en présence.

Les légendes des subdivisions hydriques et trophiques sont reprises sur le Mémo (début et fin de catalogue).

	-2	-1	0	1	2	3
-4						
-4 BHA						
-3						
-3 BHA						
-2						
-2 BHA						
-1						
-1 BHA						
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						



Cette rubrique reprend l'association phytosociologique potentielle principale que l'on peut rencontrer sur l'US, ainsi que les associations potentielles secondaires plus sporadiquement présentes.



Cette rubrique espèces indicatrices reprend les différentes espèces que l'on rencontre le plus fréquemment sur l'US et bien entendu possédant un caractère indicateur. Ces espèces sont assemblées en différents groupes indicateurs qui sont détaillés à la fin de ce catalogue. Le chiffre entre parenthèse indique le groupe (un autre) au sens du « Répertoire des groupes écologiques » du « Fichier écologique des essences ».



Remarques éventuelles

Essences observées actuellement

Essences majoritaires

Essences de production observées sur l'US

Essences disséminées

Essences présentes, mais disséminées sporadiquement dans les peuplements.

Gestion actuelle du peuplement

Répartition des objectifs de gestion sur l'US :

- % en réserve naturelle
- % en hêtraie cathédrale
- % en futaie irrégulière

Essences de production

Essences secondaires

Essences d'accompagnement

Dans les essences présente sur la zone, quelles sont celles qui sont considérées comme essence de production à part entière, quelles sont les essences considérées dans une moindre mesure (secondaires) et quelles sont celles juste appréciées comme accompagnement dans le peuplement.

Introductions possibles

D'un point de vue sylvicole, essences peu ou pas utilisées qu'il est possible d'introduire au niveau de l'US

Tentations à éviter

Essences dont on serait tenter d'introduire ou de maintenir alors qu'elles sont hors station. Si la composante Réchauffement climatique entre en jeu, le sigle (RC) suit l'essence.

Figure 68 - Description des rubriques de la deuxième page de la fiche

Chapitre 10. Aptitude des essences forestières

10.1. Introduction

Une fois le catalogue de stations élaboré, il est possible d'identifier les aptitudes des essences forestières pour chaque type de station (US). En effet, chaque US présente des conditions écologiques précises, déterminées par une combinaison donnée de paramètres écologiques. Connaissant les exigences et tolérances des essences par rapport à ces conditions écologiques, il est donc possible d'établir les aptitudes des essences. Le fichier écologique des essences et surtout le guide du boisement présentent une démarche formalisée pour définir l'aptitude actuelle. Par contre, la méthodologie est beaucoup plus délicate pour ce qui est de la prévision des aptitudes futures.

A ce stade, il est important de bien définir la notion d'aptitude utilisée, qui est un peu plus large que celle du guide du boisement ou du fichier écologique des essences, afin d'apporter des nuances dans la présentation des résultats.

- **1 = Optimum** : représente l'optimum pour l'essence, sur une station où tout porte à espérer de surcroît à une bonne productivité ;
- **2 = En station** : aucune contre-indication pour l'essence sur la station. Néanmoins, l'essence ne se trouve pas dans les meilleures conditions de productivité ;
- **3 = Tolérance** : l'US comporte un seul facteur limitant que l'essence peut tolérer (exemple: le développement de profil c pour le hêtre et les chênes). Il est important de considérer cette tolérance dans la gestion des peuplements. Dans l'exemple ci-dessus, cela se concrétisera pour le hêtre à veiller à la stabilité des arbres en limitant leur élancement et leur âge d'exploitabilité ;
- **4 = Limite de tolérance** : l'US comporte plusieurs facteurs limitants tolérés, mais avec un facteur de compensation, ce qui maintient de manière limite l'essence sur la station. La sylviculture est très délicate car les arbres et peuplements sont en conditions instables (sensibles à la sécheresse, aux vagues de chaleur, aux déracinements,...) ;
- **5 = Exclusion** : Plusieurs facteurs limitants sont tolérés, mais sans facteur de compensation. L'essence n'est plus en station. D'une part, elle ne sera plus considérée comme une essence de production, et d'autre part, elle sera sujette à des dépérissements (facteurs pré-disposant). Même si cette classe ne porte pas l'appellation « exclusion forte », cela reste une exclusion pure et simple ;
- **6 = Exclusion forte** : l'US comporte un ou plusieurs facteurs limitants forts, conduisant directement à l'exclusion. Aucune forme de compensation n'est possible (exemple : sables podzolisés pour bon nombre d'essences).

10.2. Aptitude actuelle

Pour ce qui est de l'aptitude actuelle des essences, on peut se référer au guide du boisement, éventuellement complété, le cas échéant, de données plus précises ou plus récentes. Le catalogue des stations propose déjà les niveaux climatiques, trophique et hydrique en référence au guide du boisement. Toutefois, d'autres paramètres doivent aussi entrer en compte, comme en premier lieu, la présence de fragipan. Cette démarche permet donc de cartographier l'aptitude actuelle des essences sur la forêt de Soignes. Elle est à l'origine des cartes « potentialités 2000 » présentées en fin de chapitre.

10.3. Aptitude future

10.3.1. Méthodologie générale

L'aptitude future est beaucoup plus difficile à établir en raison des incertitudes qui pèsent sur :

- le scénario de réchauffement climatique qui dépend des décisions politiques en ce qui concerne les rejets de CO₂, mais aussi de la qualité des modèles prévisionnels d'évolution du climat ;
- l'interaction entre ce changement et la station ;
- la réponse des essences à ces modifications qui sont encore loin d'être correctement appréhendées ;
- les interactions biotiques liées au changement climatique.

Au risque d'être imprécis, mais parce qu'il est impératif de proposer, dès à présent et malgré ces incertitudes, des voies de gestion adaptative aux gestionnaires, nous avons donc choisi une voie empirique, largement basée sur l'expertise actuelle, et qui procède en 3 temps :

- la qualification du risque lié à l'US. Etant donné que le monde scientifique s'accorde sur la pré-dominance du facteur sécheresse dans les perspectives de changements du climat, c'est par rapport à la notion d'économie en eau de la station que la réflexion est engagée ;
- l'identification des sensibilités des essences aux modifications des paramètres écologiques ;
- l'établissement des risques et des aptitudes par couple [essence, station] en confrontant les sensibilités de l'une avec les risques de l'autre.

La méthode repose sur un système de cotation tout à fait arbitraire qui n'a d'autre but que d'objectiver l'analyse et permet d'obtenir des niveaux de risque et d'aptitude que l'opérateur peut encore moduler selon son expérience. In fine, les aptitudes des essences peuvent être cartographiées grâce au catalogue des stations.

10.3.2. Calcul du risque climatique lié à l’US

Dans un premier temps, ce sont les risques liés au régime hydrique des sols qui sont ciblés. En effet, au niveau local, c’est essentiellement le niveau d’humidité du sol qui risque d’être contraignant dans un climat estival plus sec et plus chaud dans lequel les arbres seront amenés à consommer plus d’eau (d’autant plus que leur croissance peut aussi être stimulée par l’augmentation de la teneur en CO2 de l’air).

Une échelle de risque, variant de 1 (faible) à 4 (fort) a été établie par rapport à la croissance et au développement des arbres (notée risque « RC » sur les figures 69 à 71). Dans cette échelle, on considère que les stations très bien alimentées en eau présentent le risque le plus faible, alors que celles qui soutiennent une bonne croissance des arbres, mais dont l’alimentation en eau est essentiellement dépendante des précipitations, sont celles qui présentent le plus de risque. Quant aux types de stations déjà xériques actuellement, comme les sables podzolisés qui se situent sur les reliefs, il a été considéré qu’en dépit de leur assèchement probable, leurs faibles potentialités actuelles ne peuvent manifestement pas se dégrader significativement vis-à-vis des essences majeures que nous avons étudiées. La Figure 69 illustre le tableau des risques associés à l’US, décomposés dans les tableaux 70 et 71 (zones encadrées).

Bloc	US	Sol	Risque RC	Compensation (-1) ou Aggravation (+1) stationnelle			RC T°	RC ES	RC P°	
				Géologie	Relief	Exposition				
b1	01	Gax, ZAF, Zag, SAF	1				1			
b2	15	substrat s ou g	2				2			
	18	Sbf, Zbx								
b3	14	drainage D	3				3			
	16	substrat w ou u								
	17	sAAx, wAAx								
b4	06	Abc, Aba(b)	4	+1	Bruxelien, Ledien	plateau		4	5	5
	07					pente	froide -1	3	4	5
							chaude +1	5	6	5
	08					concave -1	3	4	5	
	09					plateau +1	4	6	6	
	11					Asschien, Tongrien	froide -1	3	5	6
					chaude +1		5	7	6	
	12				concave -1	3	5	6		
	13				plateau +1	4	6	6		
b5	05	Aba	3				3			
b6	03	Abp, Lbp	2				2			
	02	Acp, Lcp, Adp, Ldp								
b7	04	Afp	1				1			

Figure 69 - Tableau reprenant les risques liés à la station

Bloc	US	Sol	Risque RC	Compensation (-1) ou Aggravation (+1) stationnelle			RC T°	RC ES	RC P°		
				F	Géologie	Relief				Exposition	
b1	01	Gax, ZAF, Zag, SAF	1				1				
b2	15	substrat s ou g	2				2				
	18	Sbf, Zbx									
b3	14	drainage D	3				3				
	16	substrat w ou u									
	17	sAAx, wAAx									
b4	06	Abc, Aba(b)	4	+1	Bruxelien, Ledien	plateau		4	5	5	
	07			+1		pente	froide -1	3	4	5	
	08			+1			chaude +1	5	6	5	
	09			+1	concave -1	3	4	5			
	10			+1	Asschien, Tongrien	+1	plateau		4	6	6
	11			+1		pente	froide -1	3	5	6	
	12			+1			chaude +1	5	7	6	
13	+1	concave -1	3	5		6					
b5	05	Aba	3				3				
b6	03	Abp, Lbp	2				2				
	02	Acp, Lcp, Adp, Ldp									
b7	04	Afp	1				1				

Figure 70 - Répartition des US en blocs possédant une économie en eau du sol croissante. Un risque climatique (échelle de 1 à 4) est attribué à chaque bloc (encadré en rouge).

Dans un deuxième temps, pour le bloc 4 mésophile, des facteurs de compensation ou d'aggravation (de gauche à droite : Fragipan (F), géologie, relief (concavité) et exposition) viennent nuancer cette cote, et ce pour 3 risques climatiques différents (Figure 71):

- T° = risque climatique lié à l'augmentation des températures moyennes annuelles, mais également estivales.
- ES = risque climatique lié à l'augmentation des épisodes secs en saison de végétation.
- P° = risque climatique lié à l'augmentation des précipitations hivernales, qui, sur certains sols, favorisent une nappe temporaire hivernale qui se prolonge au printemps, ce qui a des conséquences négatives sur le système racinaire de certaines essences en place.

Bloc	US	Sol	Risque RC	Compensation (-1) ou Aggravation (+1) stationnelle			RC T°	RC ES	RC P°		
				F	Géologie	Relief				Exposition	
b1	01	Gax, ZAF, Zag, SAF	1				1				
b2	15	substrat s ou g	2				2				
	18	Sbf, Zbx									
b3	14	drainage D	3				3				
	16	substrat w ou u									
	17	sAAx, wAAx									
b4	06	Abc, Aba(b)	4	+1	Bruxelien, Ledien	plateau		4	5	5	
	07			+1		pente	froide -1	3	4	5	
	08			+1			chaude +1	5	6	5	
	09			+1	concave -1	3	4	5			
	10			+1	Asschien, Tongrien	+1	plateau		4	6	6
	11			+1		pente	froide -1	3	5	6	
	12			+1			chaude +1	5	7	6	
13	+1	concave -1	3	5		6					
b5	05	Aba	3				3				
b6	03	Abp, Lbp	2				2				
	02	Acp, Lcp, Adp, Ldp									
b7	04	Afp	1				1				

Figure 71 - Facteurs de compensation ou d'aggravation exprimés en fonction du risque climatique: T° = risque lié à l'augmentation des températures ; ES = risque lié à l'augmentation des épisodes secs ; P° = risque lié à l'augmentation des précipitations hivernales

Nous avons donc au final une échelle de risque allant de 1 (risque le moins élevé) à 7 (risque le plus élevé).

10.3.3. Risque climatique lié aux essences

Pour chacun des 3 risques climatiques principaux qui ont été identifiés comme significatifs au sein de la forêt de Soignes, un facteur de sensibilité est attribué aux essences. Un facteur variant de 1 à 3 signifie que l'essence est respectivement peu ou pas sensible au risque climatique considéré. Inversement, certains facteurs peuvent un effet positif sur certaines essences : -1 pour un effet positif limité (essence déjà en place dans l'intervalle de valeur du facteur limitant), -2 pour un effet positif marqué (essence n'étant pas à son optimum mais s'en rapprochant), -3 pour un effet positif très marqué (essence en exclusion ou limite de tolérance évoluant vers son optimum pour le facteur). En exemple, considérons le facteur température et le cèdre de l'Atlas : actuellement la température moyenne annuelle se révèle limitante pour le cèdre, ce qui ne sera plus du tout le cas en 2100.

Le Tableau 32 reprend ces facteurs de sensibilité pour chaque essence. Cette classification a été déduite du Fichier Ecologique des Essences et de la littérature associée à chacune des essences.

Tableau 32 - Sensibilité des essences aux différents risques climatiques:
1 = insensible; 2 = sensible; 3 = très sensible.

Essences	T°	ES	P°
Feuillus			
Fagus sylvatica	2	2	2
Quercus robur	0	1	0
Quercus petraea	0	0	0
Quercus rubra	-1	0	2
Acer pseudoplatanus	1	1	1
Fraxinus excelsior	1	1	1
Carpinus betulus	0	0	1
Prunus avium	0	1	1
Robinia pseudoacacia	-1	0	2
Betula pendula	0	1	1
Résineux			
Larix decidua	0	0	2
Larix kaempferi	0	2	1
Larix X eurolepis	0	1	1
Pinus sylvestris	0	0	0
Pinus nigra (laricio)	0	0	2
Pinus nigra (nigra)	0	0	2
Pinus nigra (koekelare)	0	0	2
Essences supplémentaires			
Tilia cordata	0	0	0
Tilia platyphyllos	0	0	0
Castanea sativa	-1	0	2
Juglans regia	-1	1	2
Juglans nigra	-1	1	1
Juglans intermedia	-1	1	2
Cedrus atlantica	-3	0	2
Cedrus libani	-3	0	2
Cedrus deodora	-3	0	2

10.3.4. Couple [essence, station]

L'adéquation des couples [essence, station] dans le cadre du réchauffement climatique est évaluée à partir de l'aptitude actuelle, laquelle est corrigée en fonction des facteurs de risque de la station et des sensibilités des essences s'y rapportant. L'algorithme utilisé est purement empirique ; il assiste l'opérateur en tentant d'objectiver ses évaluations, en prenant systématiquement en compte tous les critères de la station et de l'essence.

Le facteur sensibilité de l'essence (S) est multiplié par le risque climatique lié à la station (RC), ce qui donne la valeur (S*RC) pour chaque facteur limitant (Figure 72) : augmentation de la température, épisodes secs, précipitations hivernales. Reste encore à pondérer les différents risques (T°, ES et P°) de manière à prévoir le comportement de l'essence sur la station à l'horizon 2100.

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	3	2	4	8	2	5	10	2	5	10	51	+3	6	<---
Quercus robur	4	0	4	0	1	5	5	0	5	0	15	+1	5	<---
Quercus petraea	3	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0	0	3	
Quercus rubra	2	-1	4	-4	0	5	0	2	5	10	-3		2	
Acer pseudoplatanus	4	1	4	4	1	5	5	1	5	5	26	+1	5	<---
Fraxinus excelsior	4	1	4	4	1	5	5	1	5	5	26	+1	5	<---
Carpinus betulus	2	0	4	0	0	5	0	1	5	5	3		2	
Prunus avium	3	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	4	-4	0	5	0	2	5	10	-3		3	
Betula pendula	1	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	2	<---
Résineux														
Larix decidua	3	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		3	
Larix kaempferi	3	0	4	0	2	5	10	1	5	5	33	+2	5	<---
Larix X eurolepis	3	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Essences supplémentaires														
Tilia cordata	2	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	4	0	0	5	0	1	5	5	3		5	
Castanea sativa	3	-1	4	-4	0	5	0	1	5	5	-6		3	
Juglans regia	5	-1	4	-4	1	5	5	2	5	10	12	+1	6	<---
Juglans nigra	4	-1	4	-4	1	5	5	1	5	5	10		4	
Juglans intermedia	4	-1	4	-4	1	5	5	2	5	10	12		4	
Cedrus atlantica	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---

Figure 72 - Schéma descriptif de l'interaction entre le risque lié à la station et le facteur de sensibilité des essences.

Enfin, pour passer de l'étape « Aptitude actuelle » à l'étape « Aptitude 2100 », on additionne les facteurs de risques climatiques selon la pondération suivante : 2 pour l'augmentation de température, 3 pour l'augmentation des épisodes secs et 0,5 pour l'augmentation des précipitations hivernales (Figure 73). Cette pondération suit une certaine logique : le risque lié aux épisodes secs (ES) sera le plus prépondérant, celui lié à l'augmentation de température (T°) le sera également mais dans une moindre mesure et celui lié aux précipitations hivernales (P°) le sera beaucoup moins par rapport aux deux précédents.

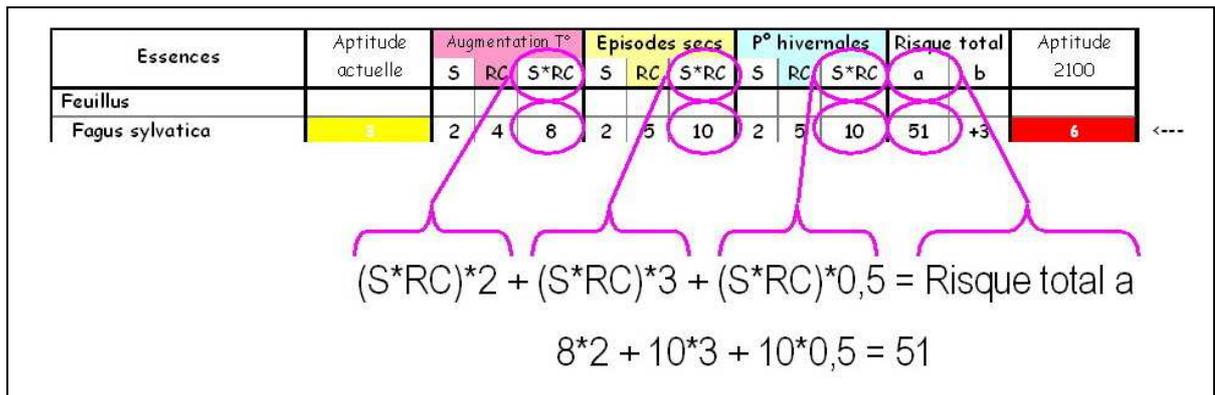


Figure 73 - Schéma reprenant le calcul intermédiaire effectué pour passer d'une "aptitude sylvicole actuelle" à une "aptitude sylvicole en 2100". La pondération des risques est illustrée dans le bas de la figure.

Les valeurs obtenues pour l'ensemble des situations (interaction essence-station) oscillent de -25 à +68. Les valeurs négatives correspondent à une amélioration de l'aptitude sylvicole et les valeurs positives à une régression de cette dernière. Une échelle quantitative a été définie afin de passer de l'aptitude actuelle à l'aptitude en 2100. Elle est illustrée à la figure suivante :

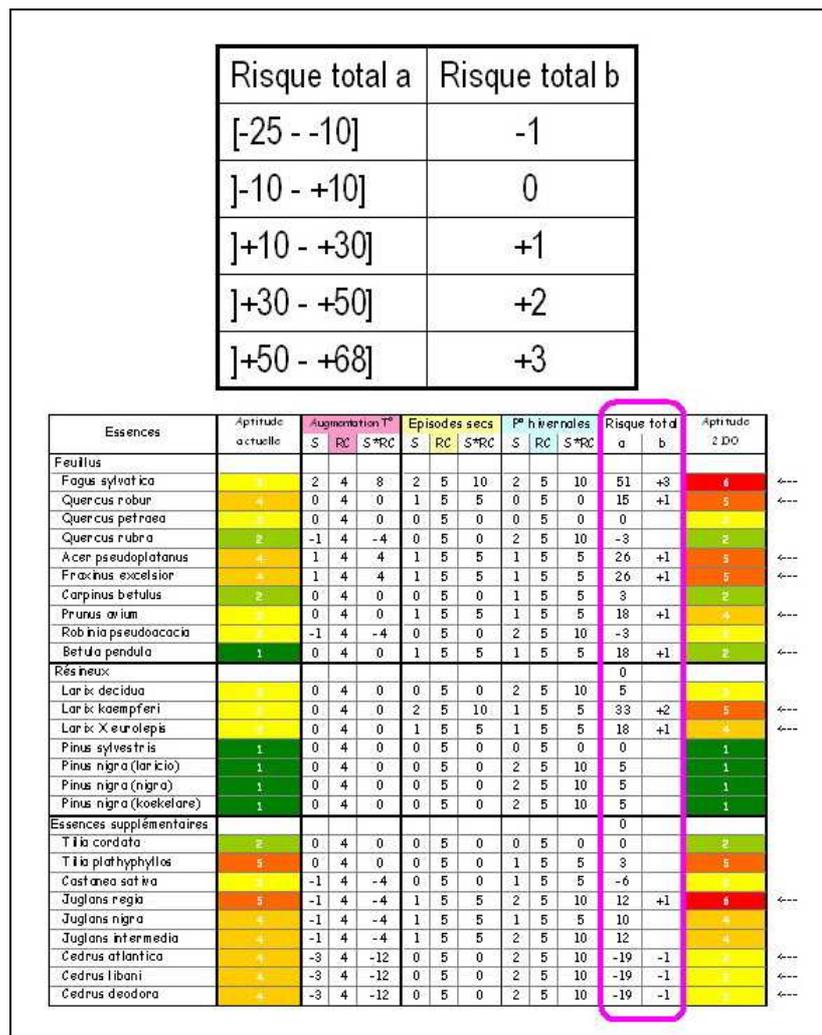


Figure 74 - Définition de classe de risque associé aux changements climatiques (risque total b) déduit du risque total a. Ces classes ont été définies par itération et expertise.

La dernière étape pour déduire l'aptitude sylvicole en 2100 consiste donc à additionner le risque total b à l'aptitude sylvicole actuelle. La figure suivante illustre cette dernière étape :

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risques total		Aptitude 2100
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b	
Feuillus													
Fagus sylvatica	3	2	4	8	2	5	10	2	5	10	51	+3	6
Quercus robur	4	0	4	0	1	5	5	0	5	0	15	+1	5
Quercus petraea	3	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		3
Quercus rubra	2	1	4	-4	0	5	0	2	5	10	-3		2
Acer pseudoplatanus	4	1	4	4	1	5	5	1	5	5	26	+1	5
Fraxinus excelsior	4	1	4	4	1	5	5	1	5	5	26	+1	5
Carpinus betulus	2	0	4	0	0	5	0	1	5	5	3		2
Prunus avium	3	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	4
Robinia pseudoacacia	3	1	4	-4	0	5	0	2	5	10	-3		3
Betula pendula	1	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	2
Résineux													
Larix decidua	3	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		3
Larix kaempferi	3	0	4	0	2	5	10	1	5	5	33	+2	5
Larix X eurolepis	3	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	4
Pinus sylvestris	1	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		1
Pinus nigra (laricio)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1
Pinus nigra (nigra)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1
Pinus nigra (koekelare)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1
Essences supplémentaires													
Tilia cordata	2	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		2
Tilia platyphyllos	3	0	4	0	0	5	0	1	5	5	3		3
Castanea sativa	3	1	4	-4	0	5	0	1	5	5	-6		3
Juglans regia	3	1	4	-4	1	5	5	2	5	10	12	+1	6
Juglans nigra	4	1	4	-4	1	5	5	1	5	5	10		4
Juglans intermedia	4	1	4	-4	1	5	5	2	5	10	12		4
Cedrus atlantica	4	3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3
Cedrus libani	4	3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3
Cedrus deodora	4	3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3

Figure 75 - Illustration de la dernière étape pour obtenir l'aptitude sylvicole en 2100 : aptitude actuelle + risque total b = aptitude 2100.

Classification des essences en fonction du risque climatique

L'outil développé, par une étape intermédiaire, nous donne l'occasion d'établir une hiérarchie allant des essences les plus touchées par les changements climatiques jusqu'aux essences les moins touchées, et enfin jusqu'aux essences les plus favorisées. Cette hiérarchie n'est valable que sur la présente zone d'étude.

Le tableau suivant présente le risque total pour chaque couple [station, essence]. Un total par essence est calculé, pondéré en fonction des surfaces respectives des Unités Stationnelles.

Tableau 33 - Risque total par essence lié aux changements climatiques, pondéré par la surface des US.

Essences	Unités Stationnelles																		Total pondéré
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Feuillus																			
Fagus sylvatica	11	22	22	11	33	51	41	61	41	58	48	68	48	33	22	33	33	22	
Quercus robur	3	6	6	3	9	15	12	18	12	18	15	21	15	9	6	9	9	6	
Quercus petraea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Quercus rubra	-1	-2	-2	-1	-3	-3	-1	-5	-1	-2	0	-4	0	-3	-2	-3	-3	-2	
Acer pseudoplatanus	5.5	11	11	5.5	17	26	21	31	21	29	24	34	24	17	11	17	17	11	
Fraxinus excelsior	5.5	11	11	5.5	17	26	21	31	21	29	24	34	24	17	11	17	17	11	
Carpinus betulus	0.5	1	1	0.5	1.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3	3	3	1.5	1	1.5	1.5	1	
Prunus avium	3.5	7	7	3.5	11	18	15	21	15	21	18	24	18	11	7	11	11	7	
Robinia pseudoacacia	-1	-2	-2	-1	-3	-3	-1	-5	-1	-2	0	-4	0	-3	-2	-3	-3	-2	
Betula pendula	3.5	7	7	3.5	11	18	15	21	15	21	18	24	18	11	7	11	11	7	
Résineux																			
Larix decidua	1	2	2	1	3	5	5	5	5	6	6	6	6	3	2	3	3	2	
Larix kaempferi	6.5	13	13	6.5	20	33	27	39	27	39	33	45	33	20	13	20	20	13	
Larix X eurolepis	3.5	7	7	3.5	11	18	15	21	15	21	18	24	18	11	7	11	11	7	
Pinus sylvestris	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Pinus nigra (laricio)	1	2	2	1	3	5	5	5	5	6	6	6	6	3	2	3	3	2	
Pinus nigra (nigra)	1	2	2	1	3	5	5	5	5	6	6	6	6	3	2	3	3	2	
Pinus nigra (koekelare)	1	2	2	1	3	5	5	5	5	6	6	6	6	3	2	3	3	2	
Essences supplémentaires																			
Tilia cordata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tilia platyphyllos	0.5	1	1	0.5	1.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3	3	3	1.5	1	1.5	1.5	1	
Castanea sativa	-1.5	-3	-3	-1.5	-4.5	-5.5	-3.5	-7.5	-3.5	-5	-3	-7	-3	-4.5	-3	-4.5	-4.5	-3	
Juglans regia	2	4	4	2	6	12	11	13	11	16	15	17	15	6	4	6	6	4	
Juglans nigra	1.5	3	3	1.5	4.5	9.5	8.5	11	8.5	13	12	14	12	4.5	3	4.5	4.5	3	
Juglans intermedia	2	4	4	2	6	12	11	13	11	16	15	17	15	6	4	6	6	4	
Cedrus atlantica	-5	-10	-10	-5	-15	-19	-13	-25	-13	-18	-12	-24	-12	-15	-10	-15	-15	-10	
Cedrus libani	-5	-10	-10	-5	-15	-19	-13	-25	-13	-18	-12	-24	-12	-15	-10	-15	-15	-10	
Cedrus deodora	-5	-10	-10	-5	-15	-19	-13	-25	-13	-18	-12	-24	-12	-15	-10	-15	-15	-10	

En s'occupant que du total pondéré et en hiérarchisant les essences de la plus touchée à la plus favorisée, nous obtenons le tableau 35. Ce total confirme bien la position problématique du hêtre face aux changements climatiques.

Tableau 34 - Hiérarchie des essences en fonction du risque climatique total (somme pondérée des US).

Essences	Total pondéré
<i>Fagus sylvatica</i>	48.3
<i>Larix kaempferi</i>	31.7
<i>Acer pseudoplatanus</i>	24.2
<i>Fraxinus excelsior</i>	24.2
<i>Prunus avium</i>	17.1
<i>Betula pendula</i>	17.1
<i>Larix X eurolepis</i>	17.1
<i>Quercus robur</i>	14.6
<i>Juglans regia</i>	12.6
<i>Juglans intermedia</i>	12.6
<i>Juglans nigra</i>	10.1
<i>Larix decidua</i>	5.0
<i>Pinus nigra (laricio)</i>	5.0
<i>Pinus nigra (nigra)</i>	5.0
<i>Pinus nigra (koekelare)</i>	5.0
<i>Carpinus betulus</i>	2.5
<i>Tilia platyphyllos</i>	2.5
<i>Quercus petraea</i>	0.0
<i>Pinus sylvestris</i>	0.0
<i>Tilia cordata</i>	0.0
<i>Quercus rubra</i>	-2.1
<i>Robinia pseudoacacia</i>	-2.1
<i>Castanea sativa</i>	-4.6
<i>Cedrus atlantica</i>	-16.2
<i>Cedrus libani</i>	-16.2
<i>Cedrus deodora</i>	-16.2

Le tableau de risques lié aux essences pour chaque US est illustré à la Figure 76. En prenant en compte les différentes contributions des risques, une aptitude sylvicole en 2100 de l'essence est déduite. Plus d'explications sont fournies dans les paragraphes suivants.

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	3	2	4	8	2	5	10	2	5	10	51	+3	6	<---
Quercus robur	4	0	4	0	1	5	5	0	5	0	15	+1	5	<---
Quercus petraea	3	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	4	-4	0	5	0	2	5	10	-3		2	
Acer pseudoplatanus	4	1	4	4	1	5	5	1	5	5	26	+1	5	<---
Fraxinus excelsior	4	1	4	4	1	5	5	1	5	5	26	+1	5	<---
Carpinus betulus	2	0	4	0	0	5	0	1	5	5	3		2	
Prunus avium	3	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	4	<---
Robinia pseudocacia	3	-1	4	-4	0	5	0	2	5	10	-3		3	<---
Betula pendula	1	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		3	
Larix kaempferi	3	0	4	0	2	5	10	1	5	5	33	+2	5	<---
Larix X eurolepis	3	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	4	0	0	5	0	1	5	5	3		5	
Castanea sativa	3	-1	4	-4	0	5	0	1	5	5	-6		3	
Juglans regia	5	-1	4	-4	1	5	5	2	5	10	12	+1	6	<---
Juglans nigra	4	-1	4	-4	1	5	5	1	5	5	10		4	
Juglans intermedia	4	-1	4	-4	1	5	5	2	5	10	12		4	
Cedrus atlantica	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---

Figure 76 - Tableau des risques associés aux essences, permettant la prévision d'une aptitude sylvicole pour 2100 (exemple de l'US6).

10.3.5. Cartographie du risque climatique par essence

L'attribution d'une aptitude actuelle et future pour chaque station permet d'établir des cartes que l'on peut comparer (plus de détails sont présentés en annexe 4). C'est l'objet des « cartes de potentialités » qui suivent.

Compte tenu des nombreuses approximations (tant au niveau des scénarios de changement climatique qu'à celui de la réaction des arbres et de l'écosystème tout entier à ces changements) qui ont conduit à la détermination d'une aptitude dans le climat futur, ces cartes doivent surtout être considérées comme un support à la réflexion, à utiliser en paires, indiquant le sens de l'évolution des potentialités des essences de la forêt de Soignes par rapport à la situation actuelle.

Excepté pour les essences robustes (pins, bouleau), l'aptitude des essences n'est pas excellente en forêt de Soignes ; en cause la présence du fragipan qui limite l'enracinement et les remontées capillaires et contribue à l'acidité de surface.

Dans le cadre du réchauffement climatique, cette situation n'est pas favorable puisqu'elle risque d'accentuer les sécheresses de surface et les engorgements de sol au printemps. Les essences qui seront les plus touchées seront celles qui de surcroît sont affectées par la chaleur : en particulier le hêtre, l'érable sycomore et le mélèze du Japon, à caractère sub-montagnard. Une série d'essences semble par contre peu sensibles : le chêne rouge, le robinier, le tilleul à petites feuilles, le bouleau verruqueux et les pins, ainsi que le chêne sessile. Des essences plus termophiles, rares ou inexistantes en forêt de Soignes ont aussi été envisagées : les cèdres et le châtaigner, qui pourraient posséder un potentiel de développement à plus long terme, mais ne sont pas encore tout à fait adaptées actuellement. Encore une fois, le fragipan ne leur serait pas favorable.

Légende des cartes

	Optimum	situation écologique optimale pour l'essence, où tout porte à espérer de surcroît une très bonne productivité
	En station	l'essence est en bonne adéquation avec la station et s'y développe sans contrainte majeure
	Tolérance	la station comporte un facteur limitant que l'essence peut tolérer (ex: fragipan pour le hêtre ou le chêne sessile). Il est important de considérer cette faiblesse dans la gestion des peuplements (dans le même exemple, cela se traduira pour le hêtre en des mesures visant à optimiser la stabilité des arbres en limitant leur élancement et leur âge à l'exploitation)
	Limite de tolérance	la station comporte plusieurs facteurs de tolérance, avec l'un ou l'autre facteur de compensation. La sylviculture y devient très délicate car les peuplements sont en conditions instables.
	Exclusion	plusieurs facteurs limitants sont tolérés, sans aucune compensation, prédisposant les peuplements aux phénomènes de dépérissements. Quelle que soit la sylviculture, l'essence n'est pas apte à produire du bois de qualité.
	Exclusion forte	l'essence n'est pas capable de former des peuplements viables sur la station

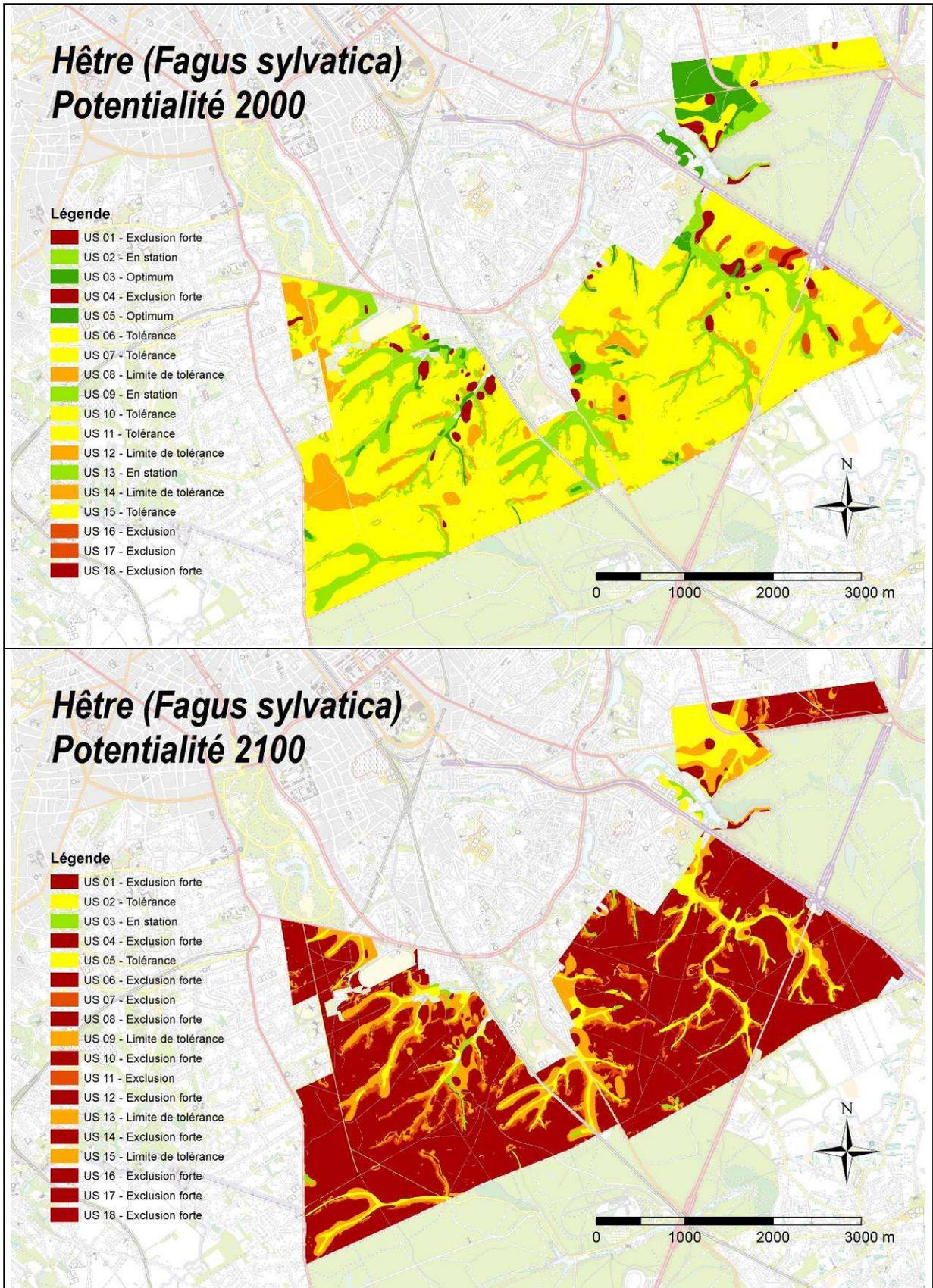


Figure 77 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le hêtre

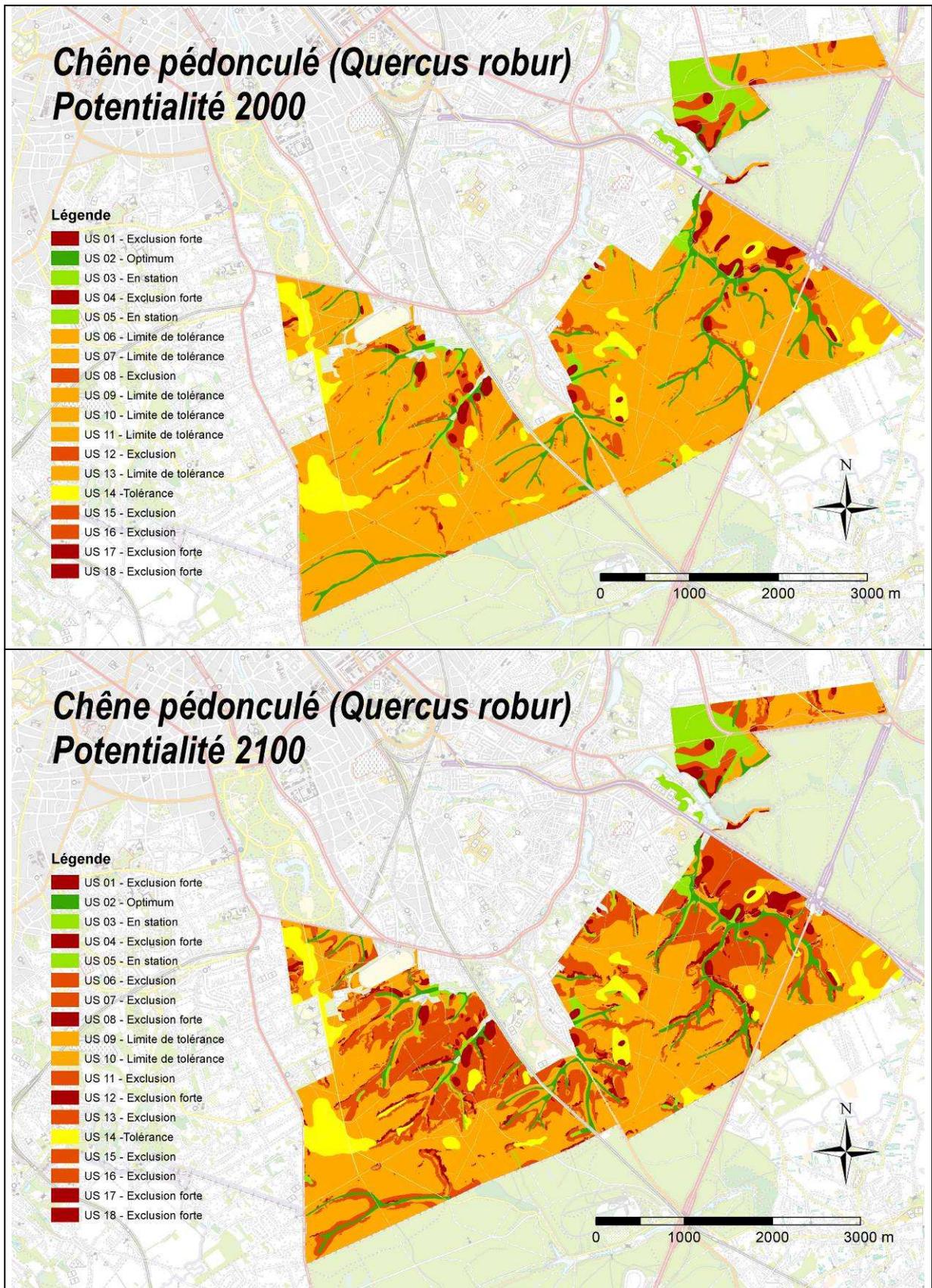


Figure 78 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le chêne pédonculé.

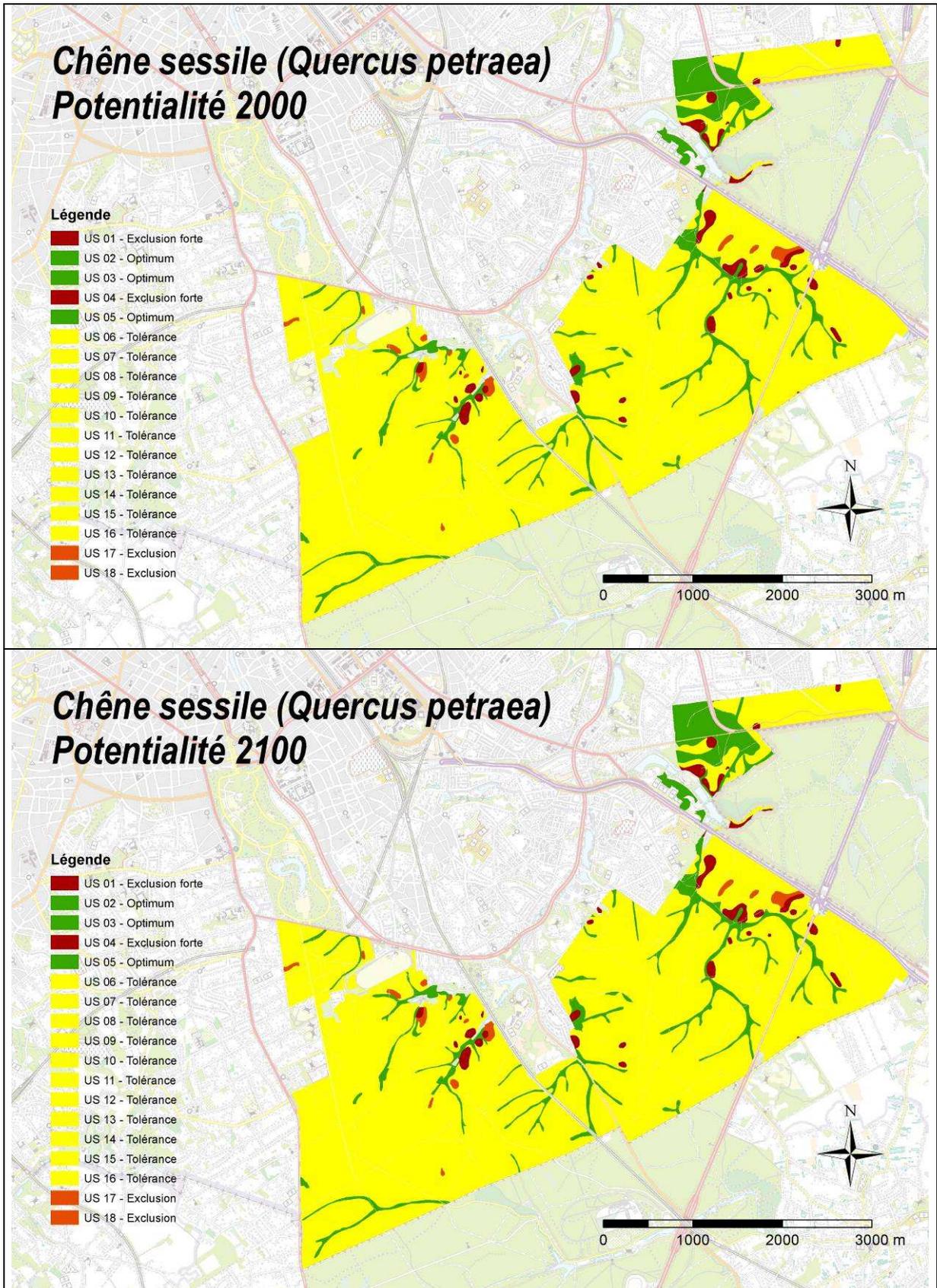


Figure 79 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le chêne sessile.

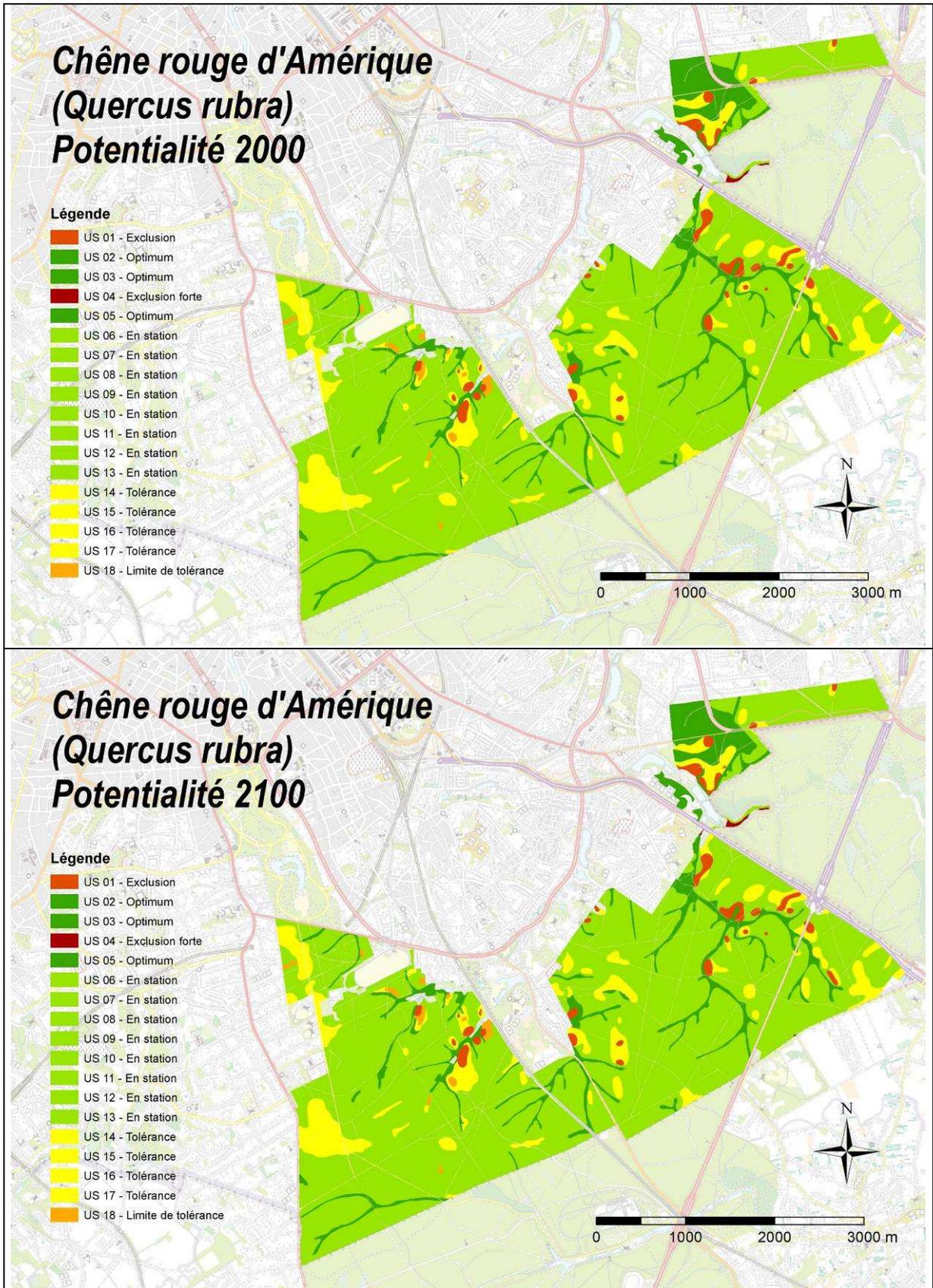


Figure 80 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le chêne rouge.

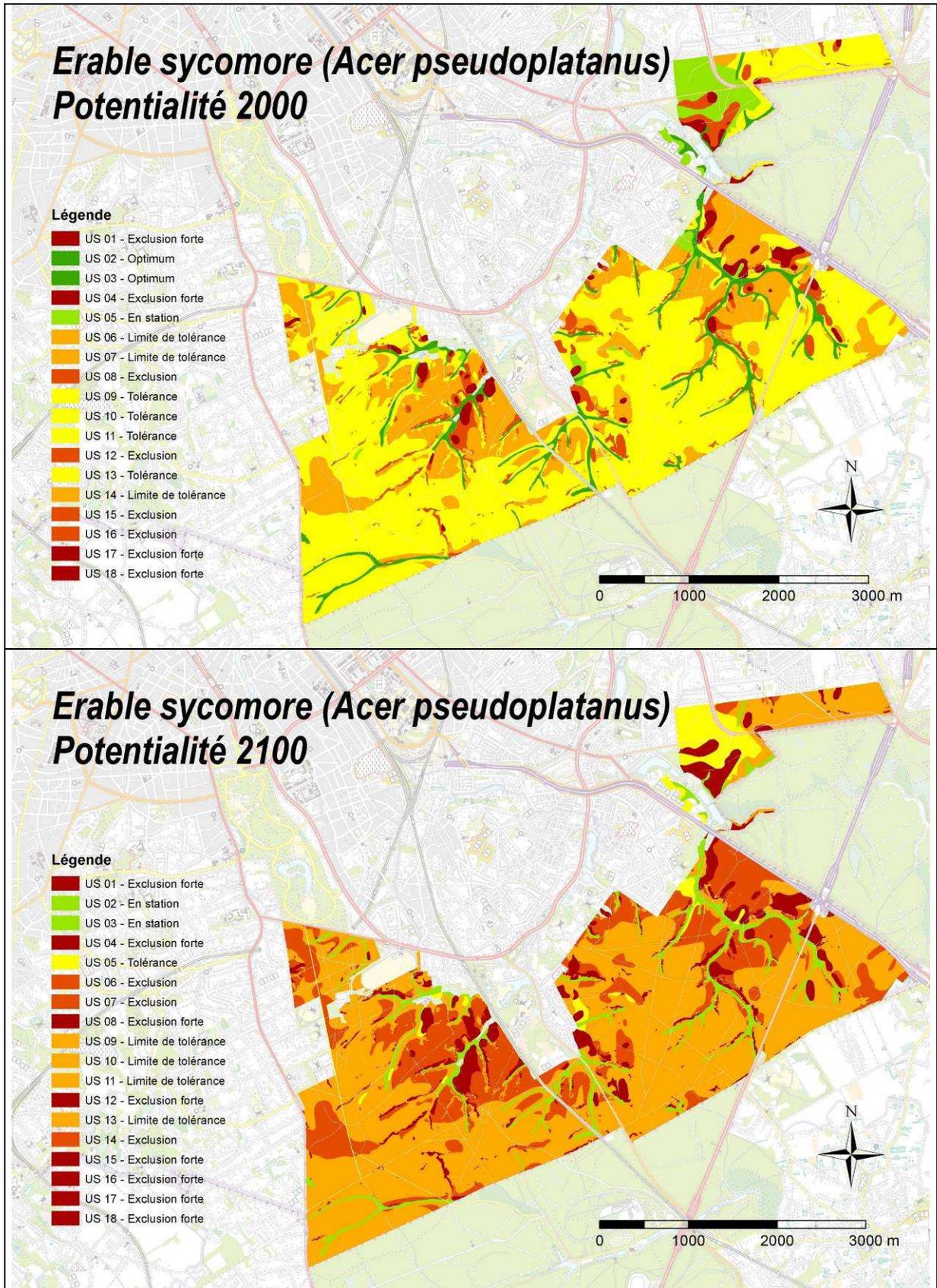


Figure 81 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour l'érable sycomore.

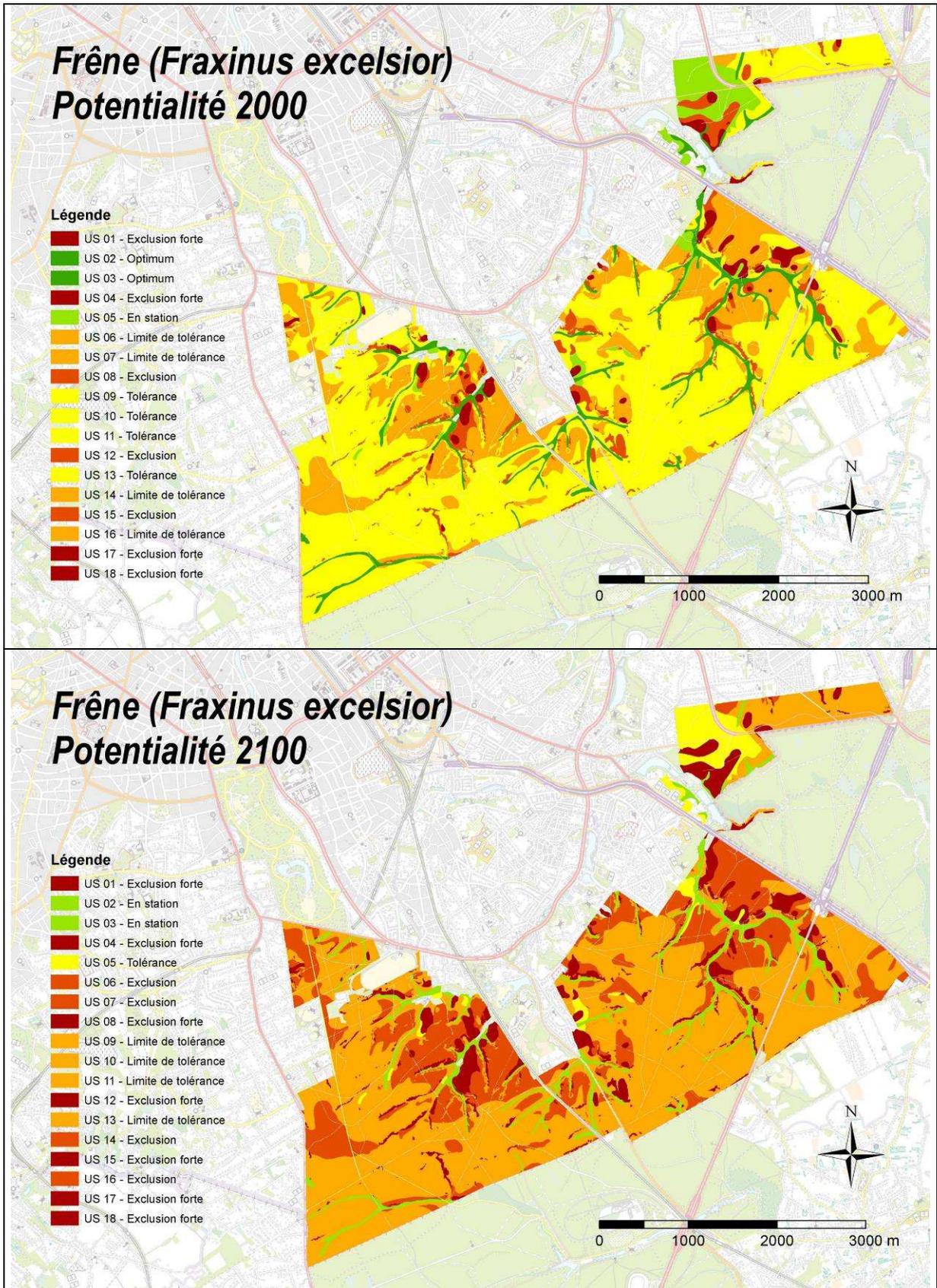


Figure 82 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le frêne.

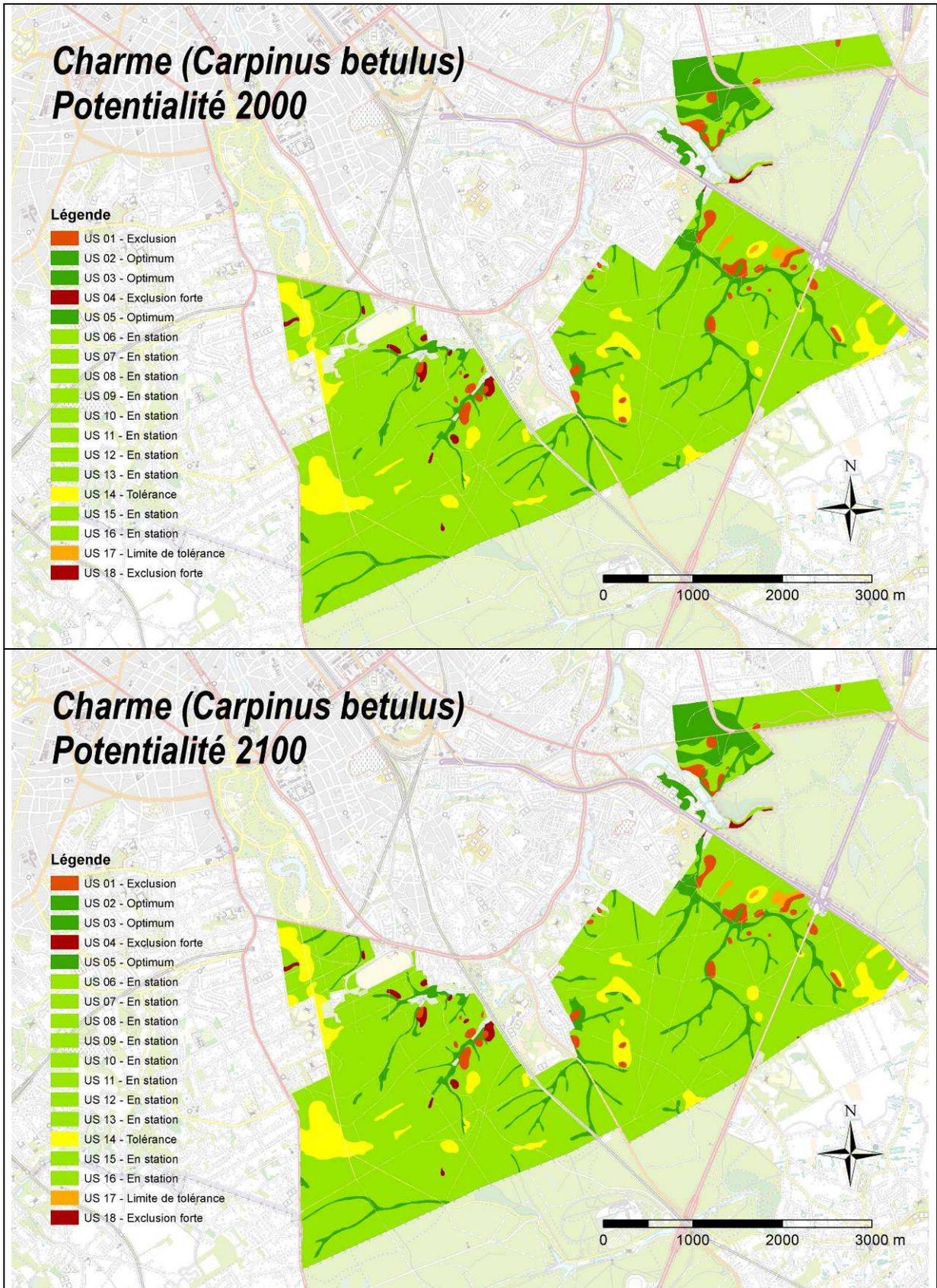


Figure 83 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le charme.

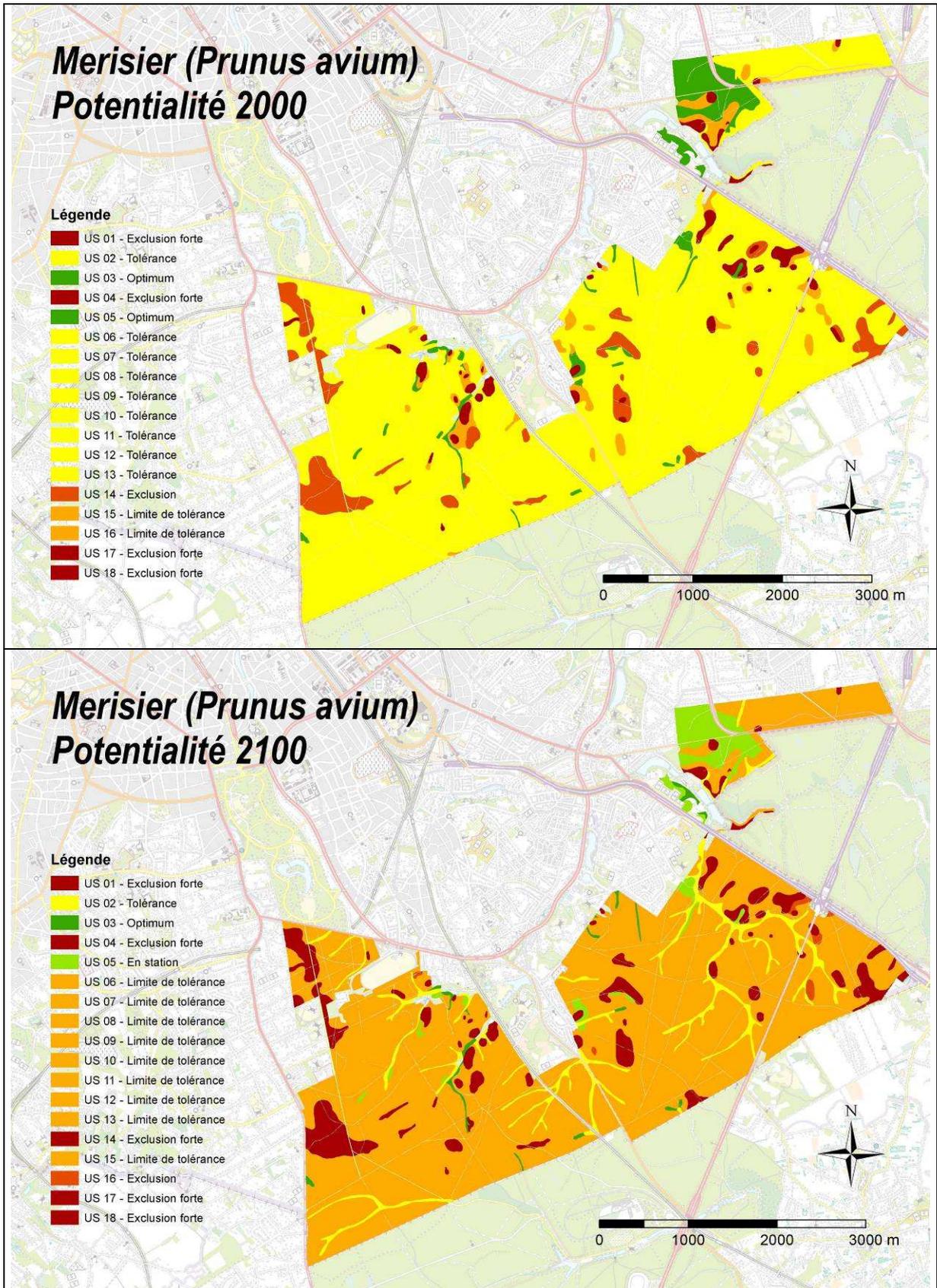


Figure 84 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le merisier.

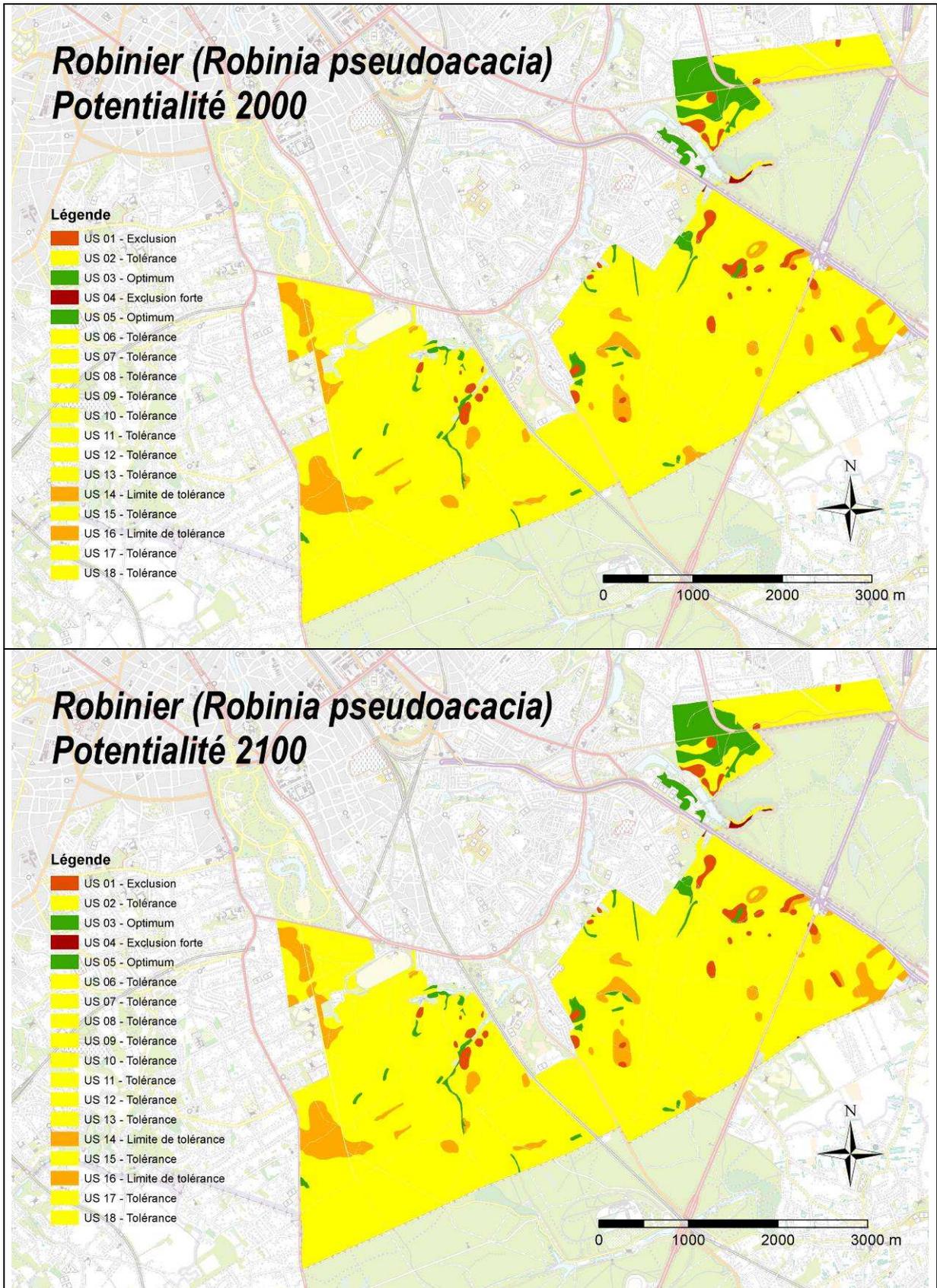


Figure 85 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le robinier.

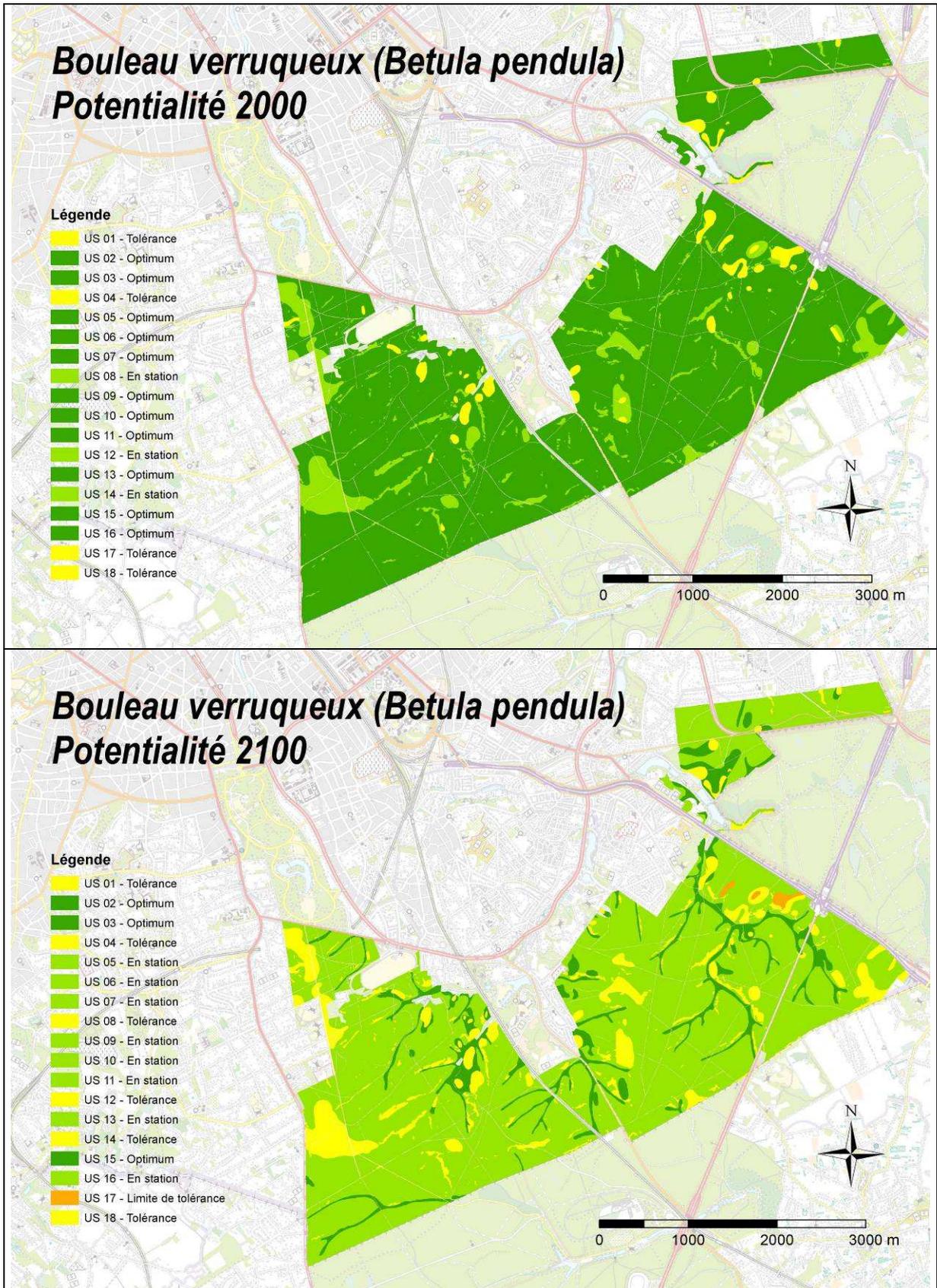


Figure 86 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le bouleau.

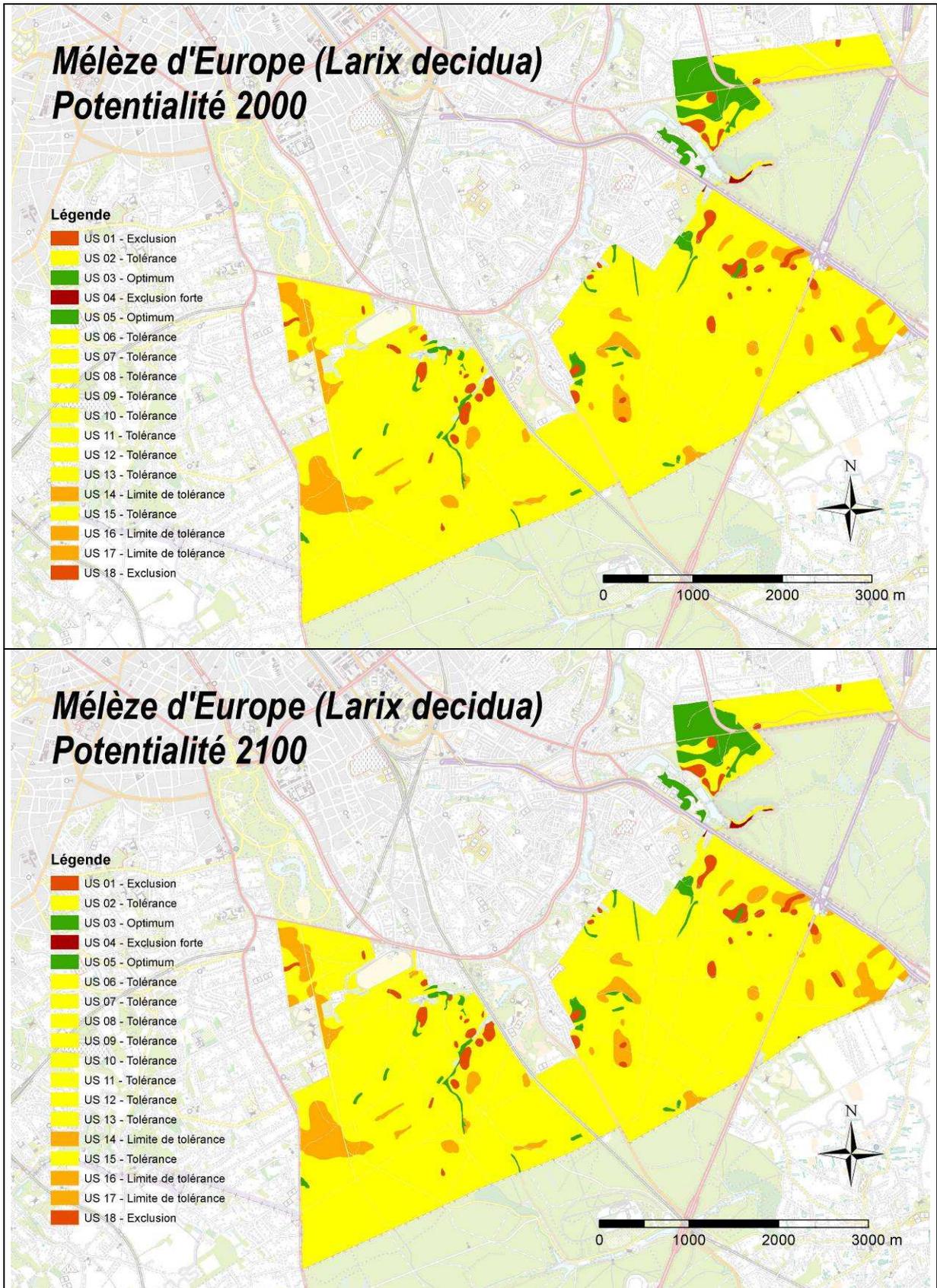


Figure 87 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le mélèze d'Europe

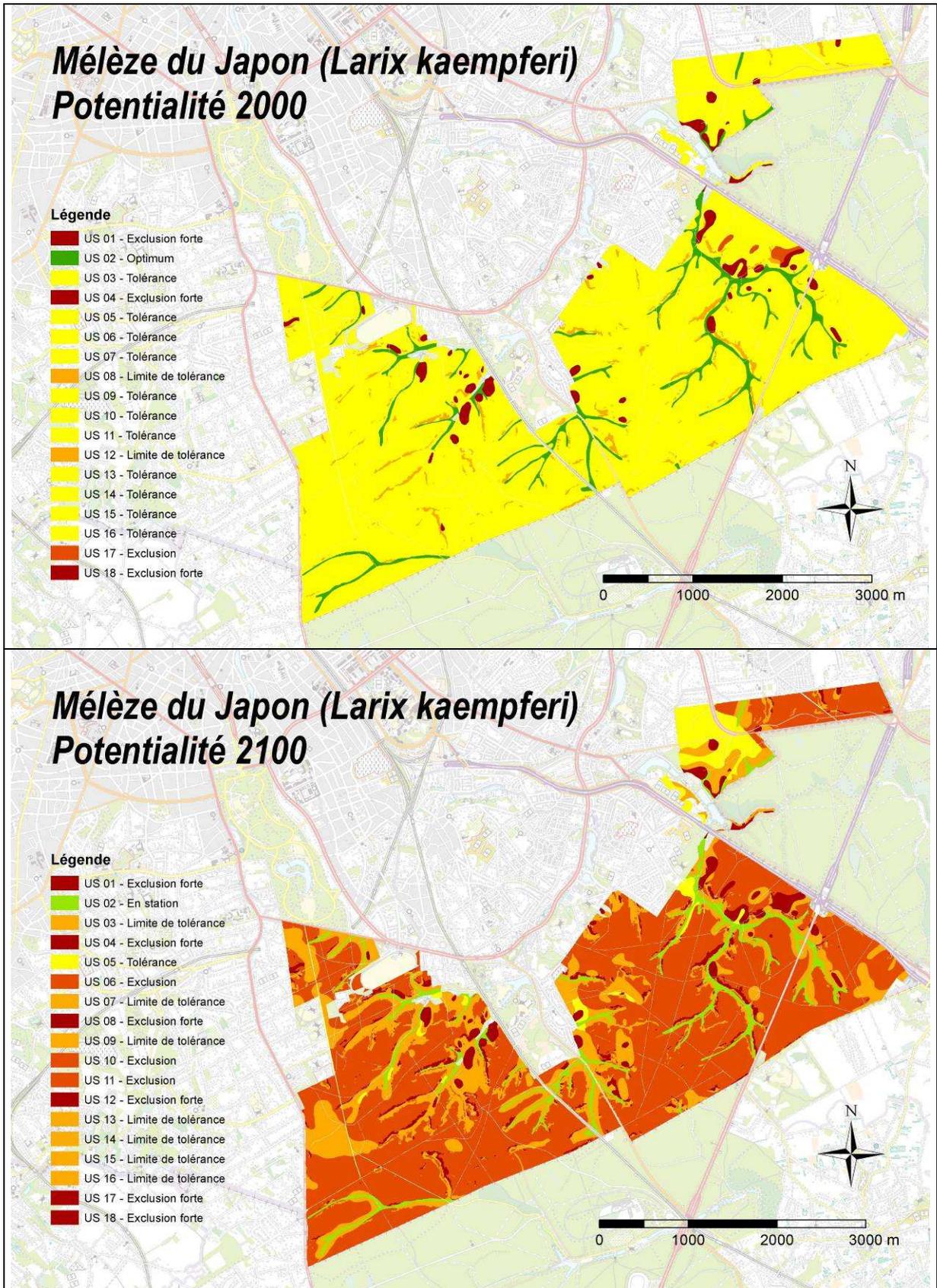


Figure 88 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le mélèze du Japon.

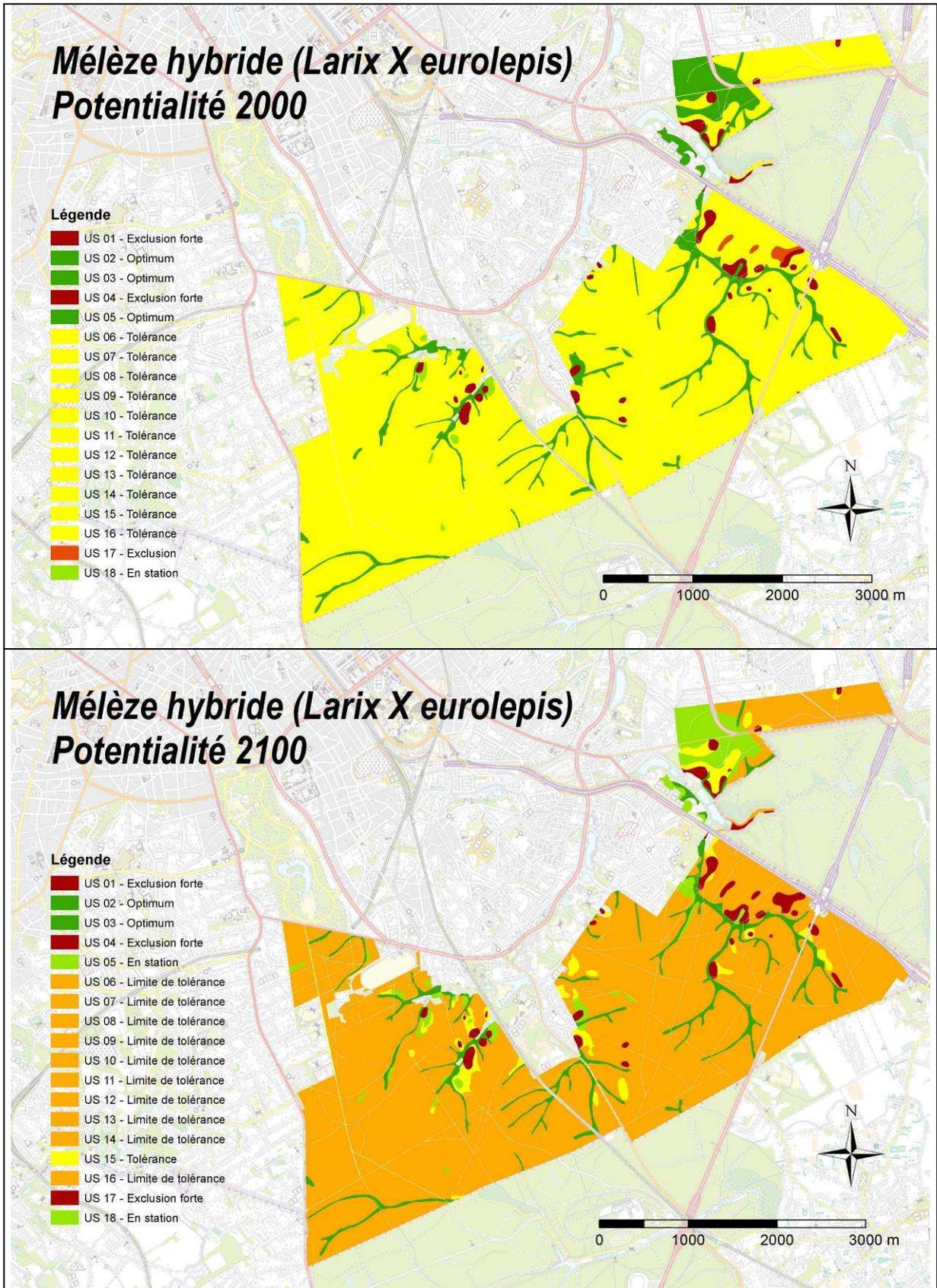


Figure 89 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le mélèze hybride.

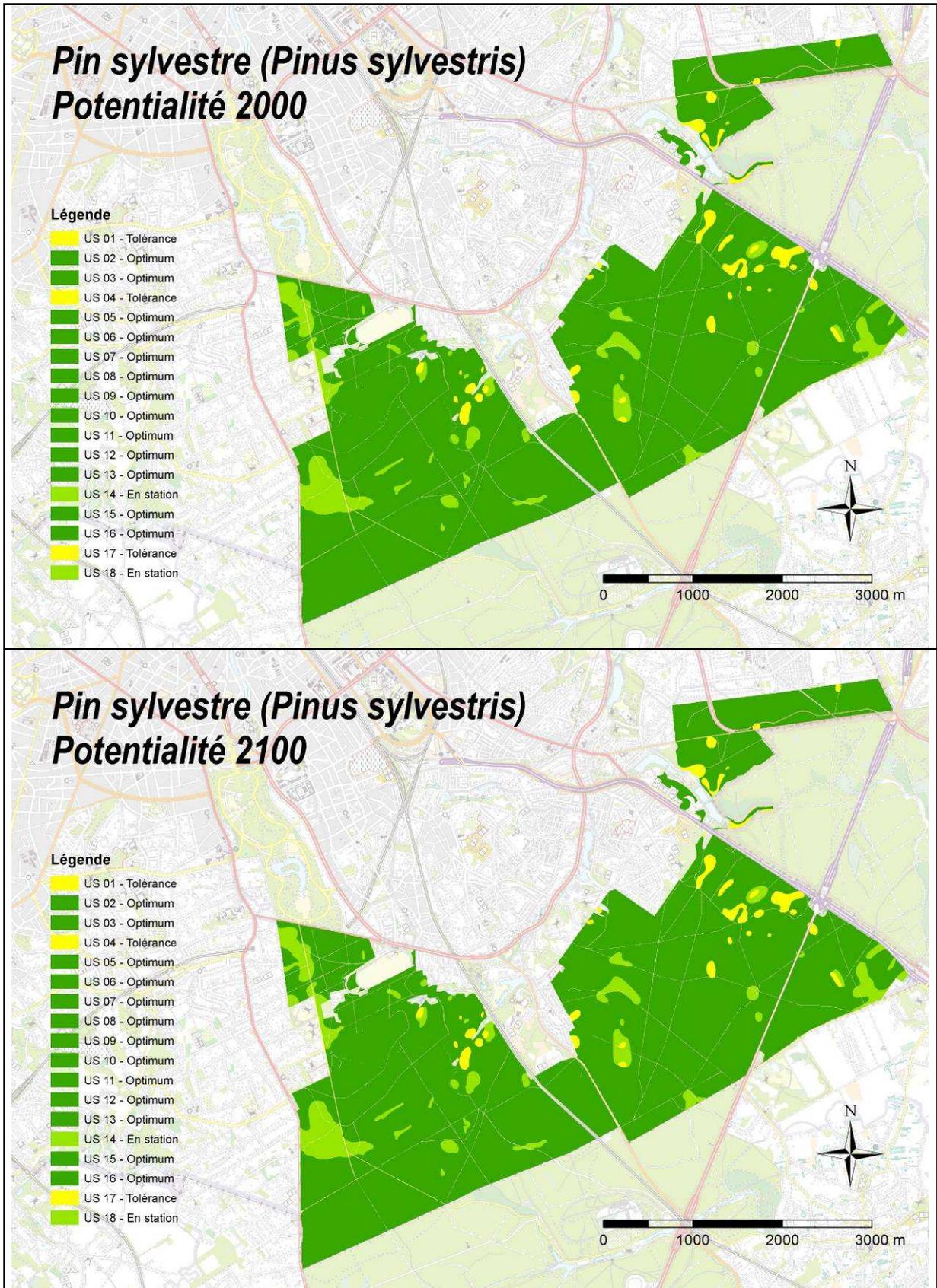


Figure 90 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le pin sylvestre

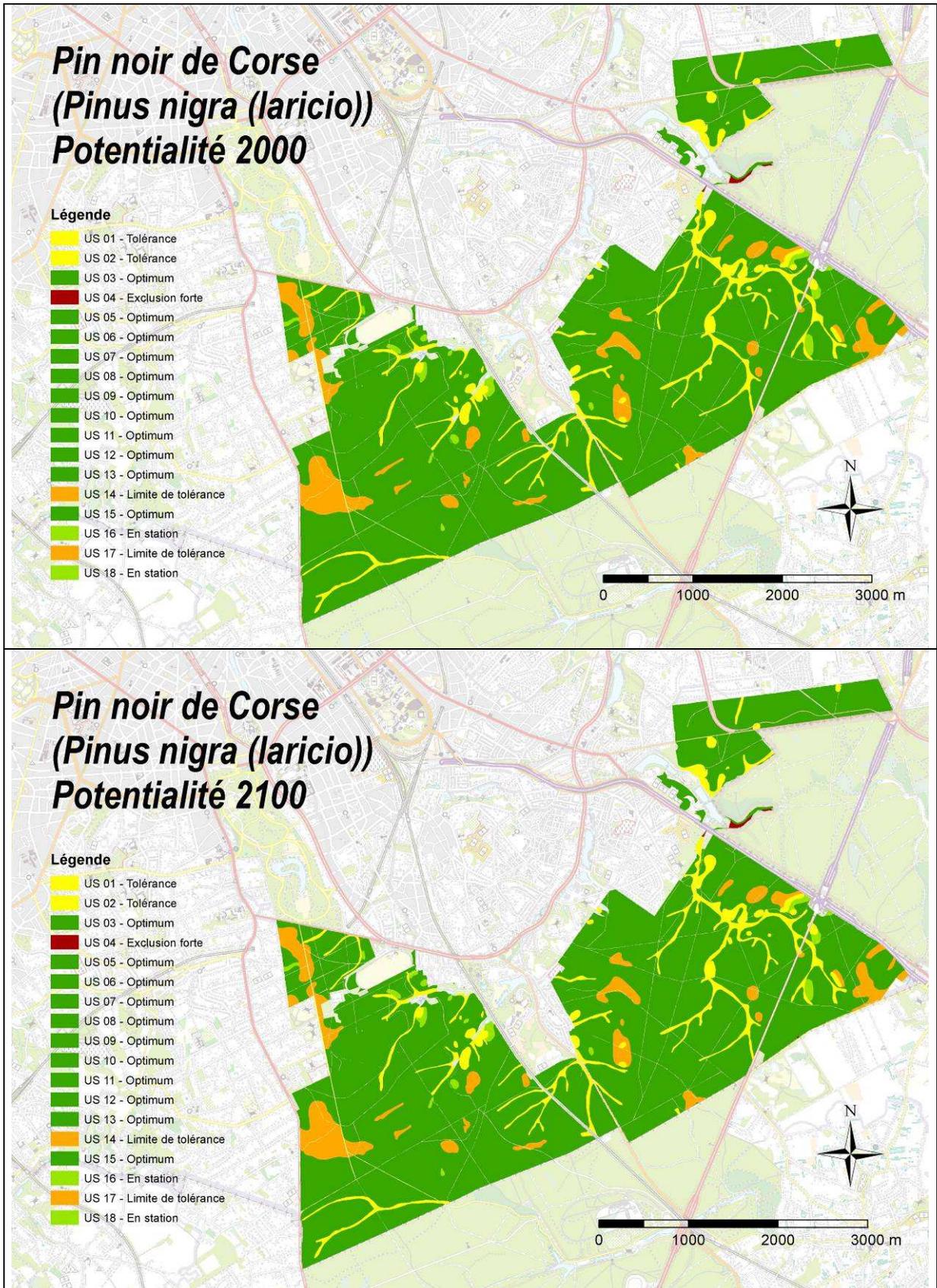


Figure 91 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le pin noir de Corse.

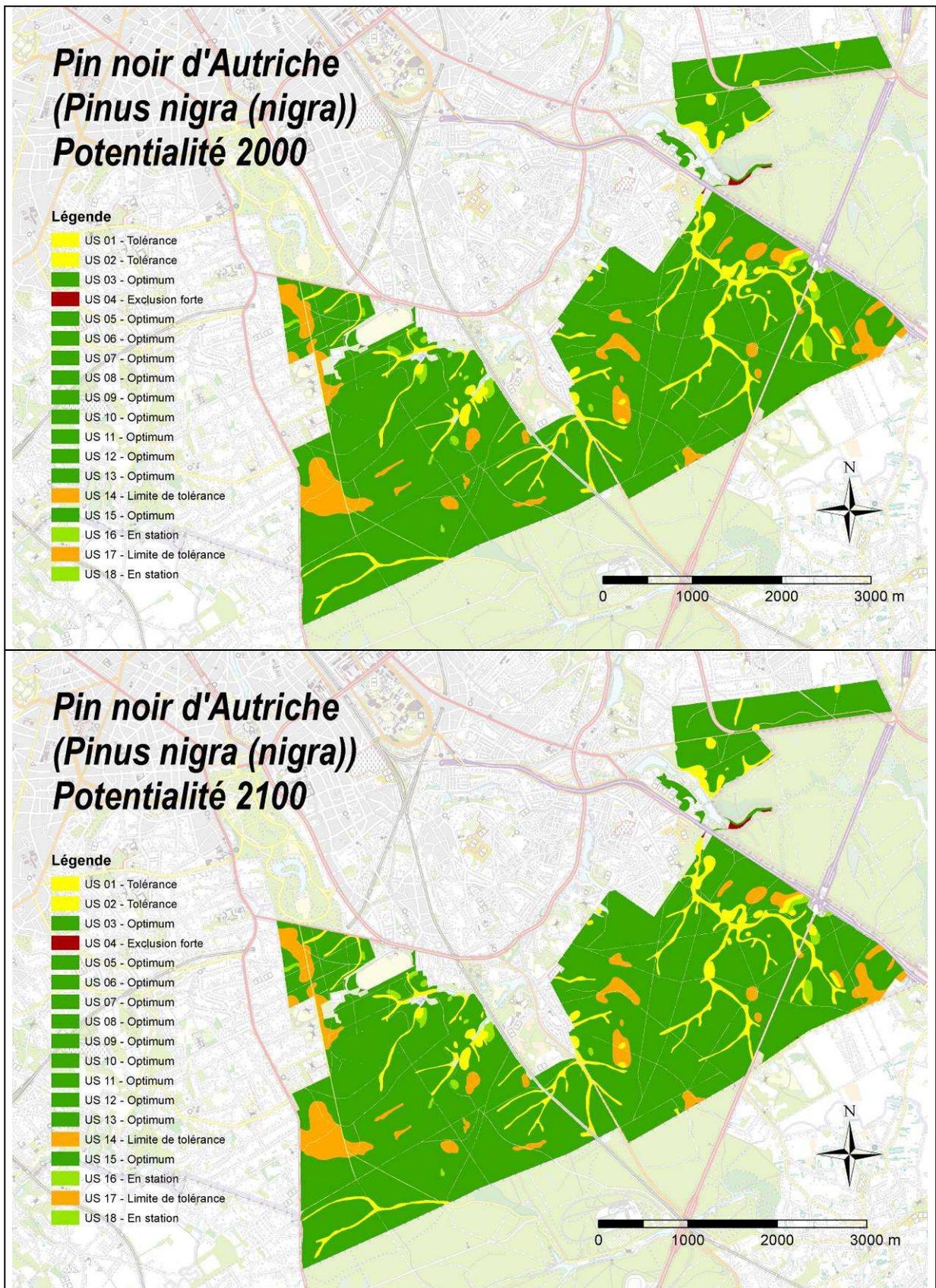


Figure 92 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le pin noir d'Autriche.

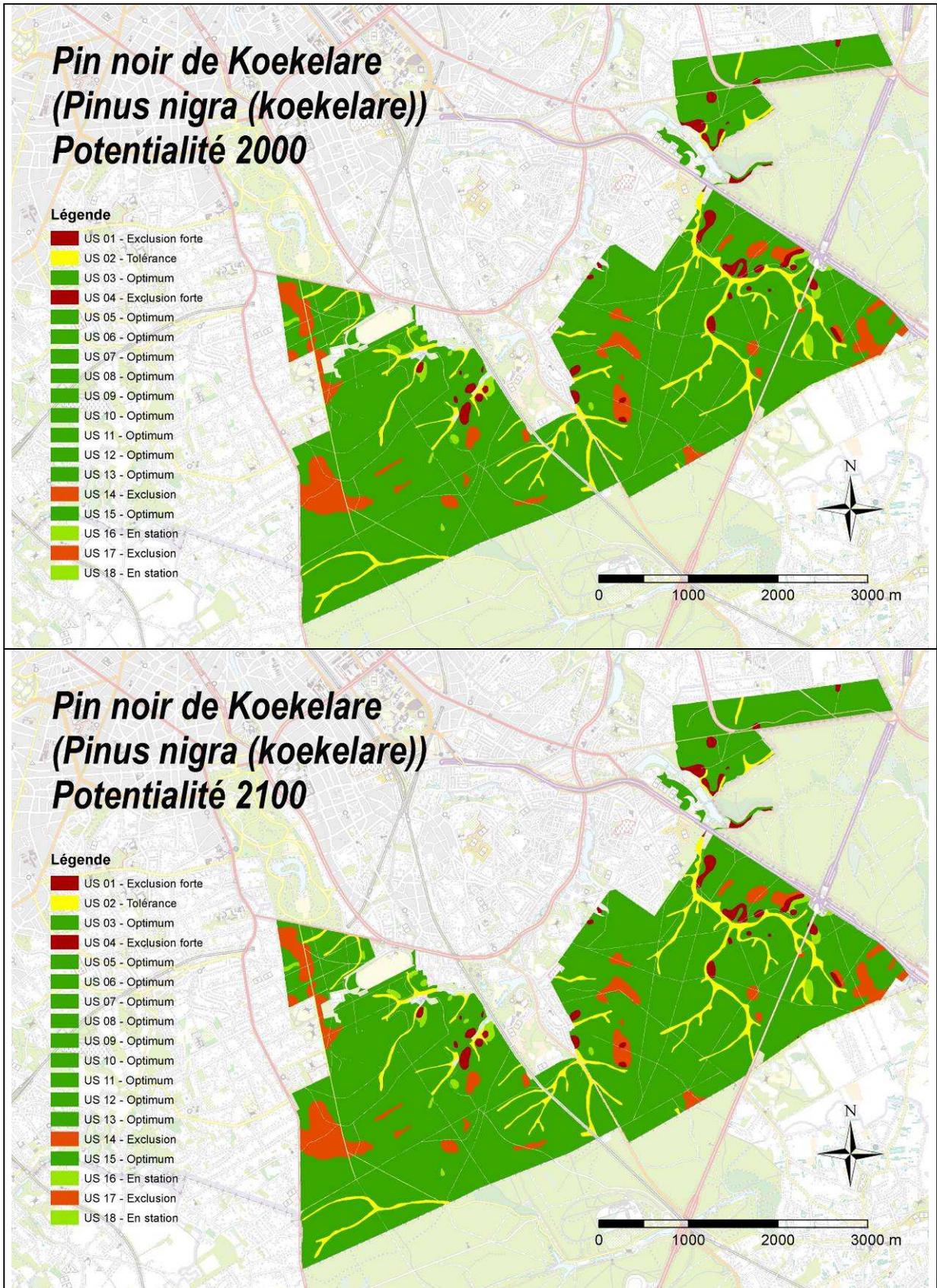


Figure 93 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le pin noir de Koekelare.

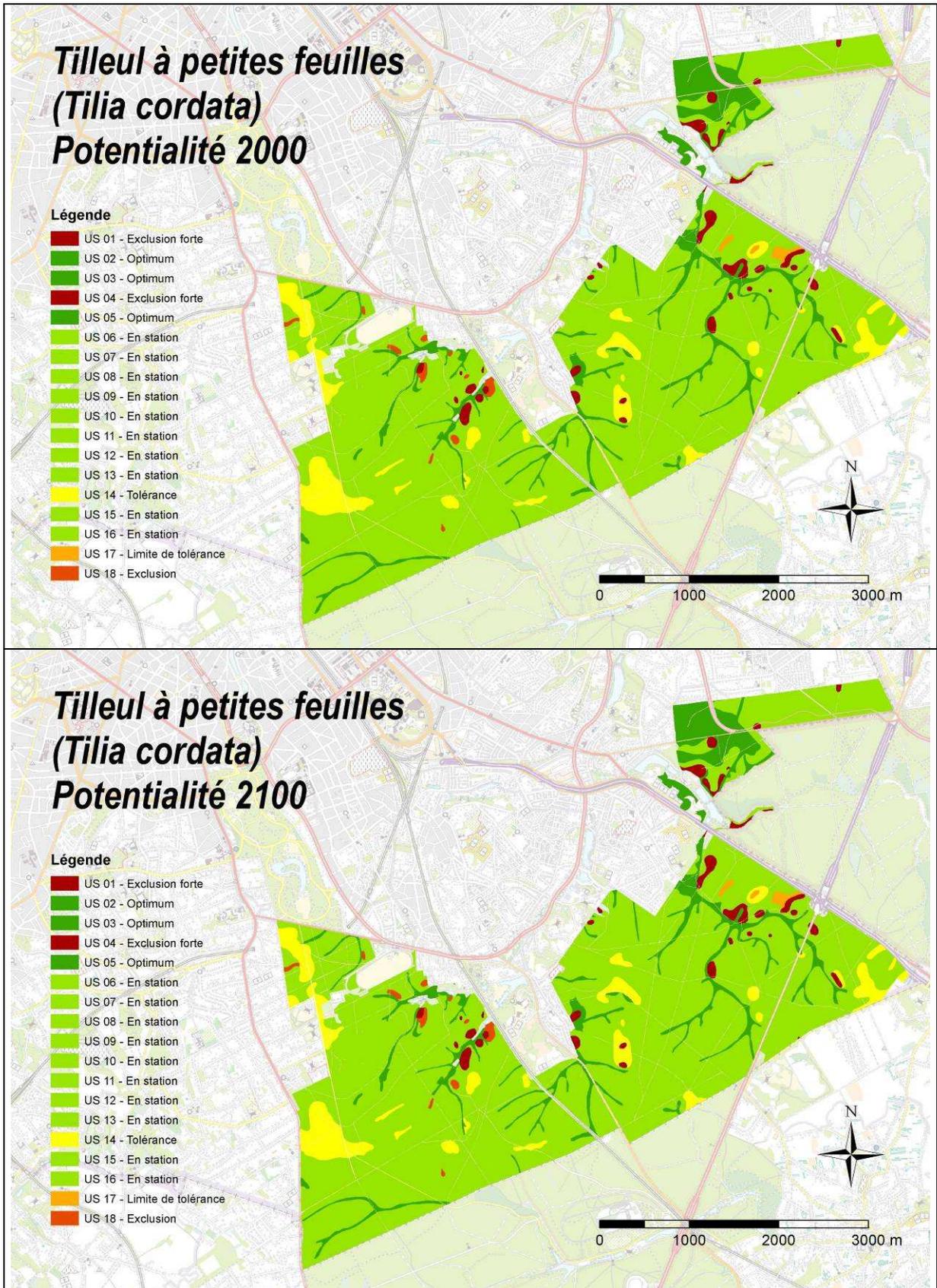


Figure 94 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le tilleul à petites feuilles.

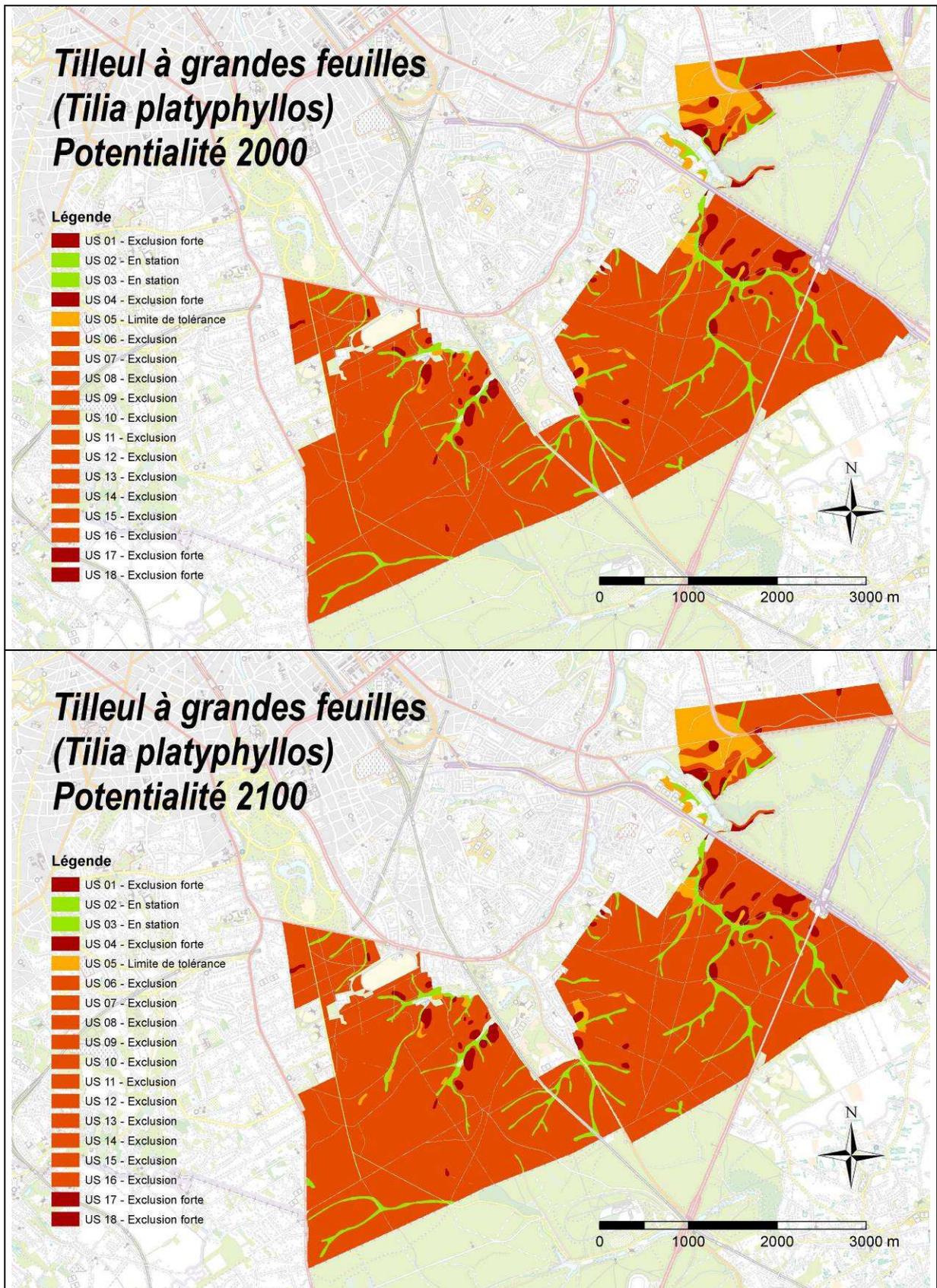


Figure 95 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le tilleul à grandes feuilles.

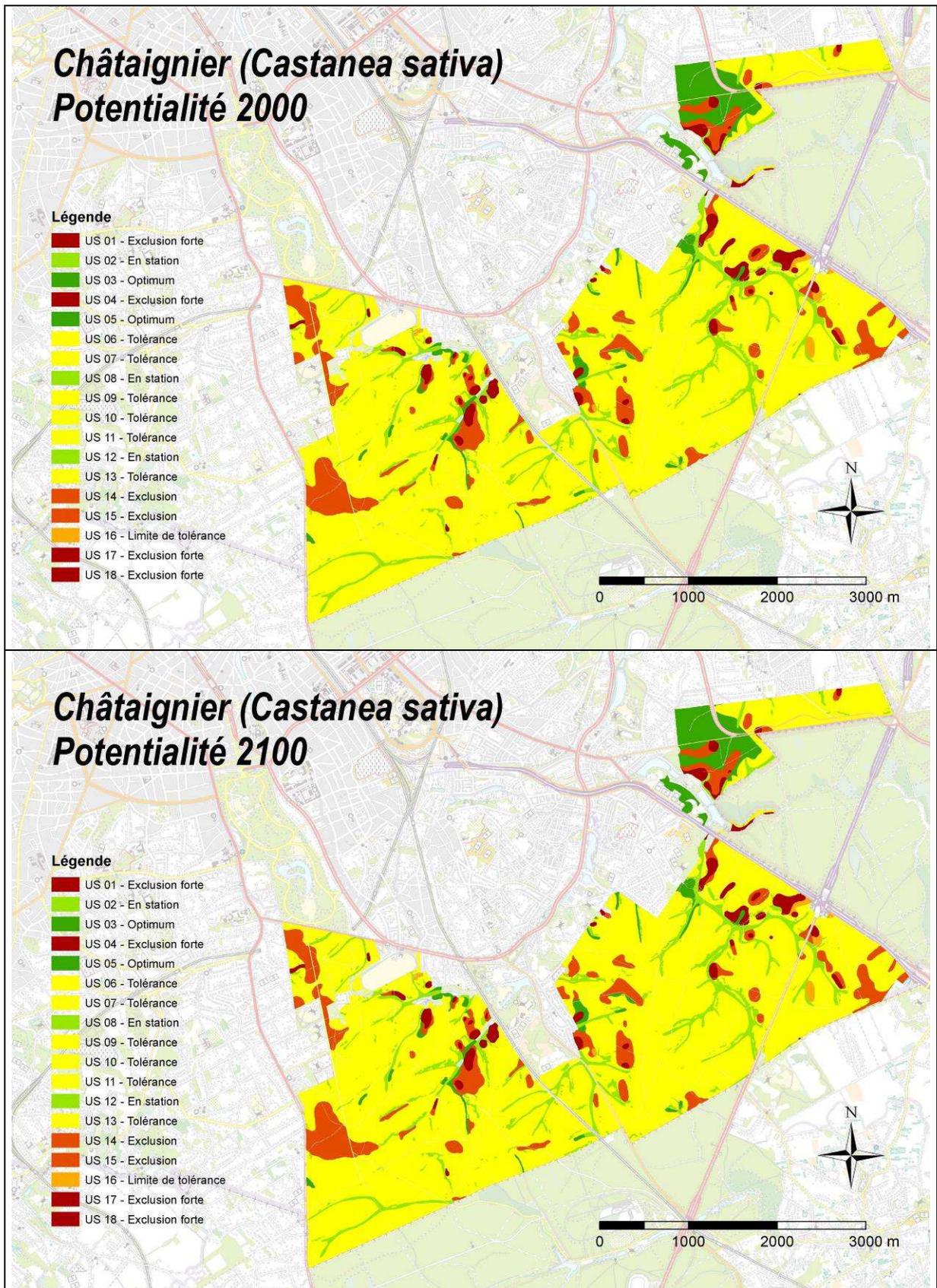


Figure 96 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le châtaignier.

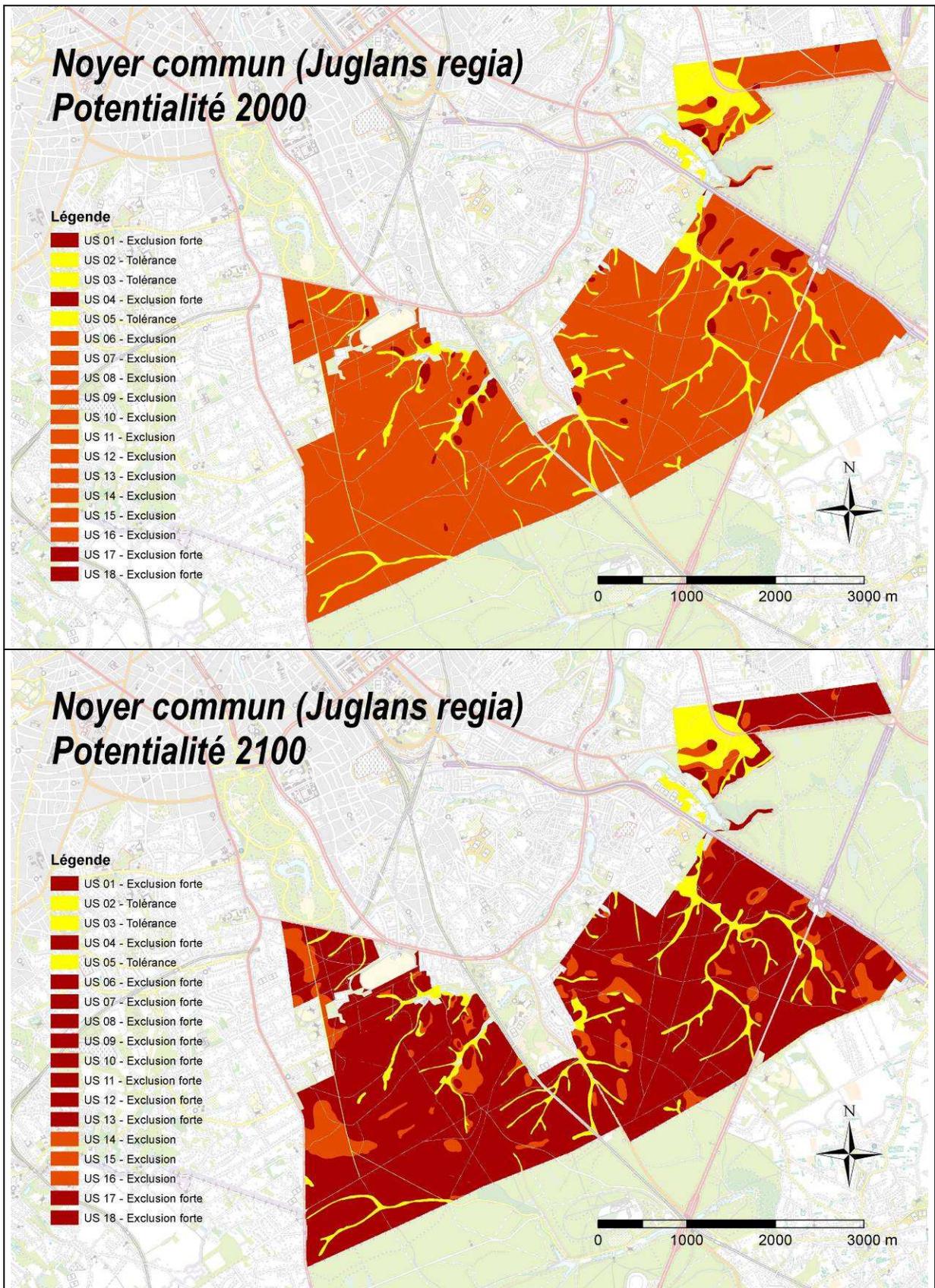


Figure 97 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le noyer commun.

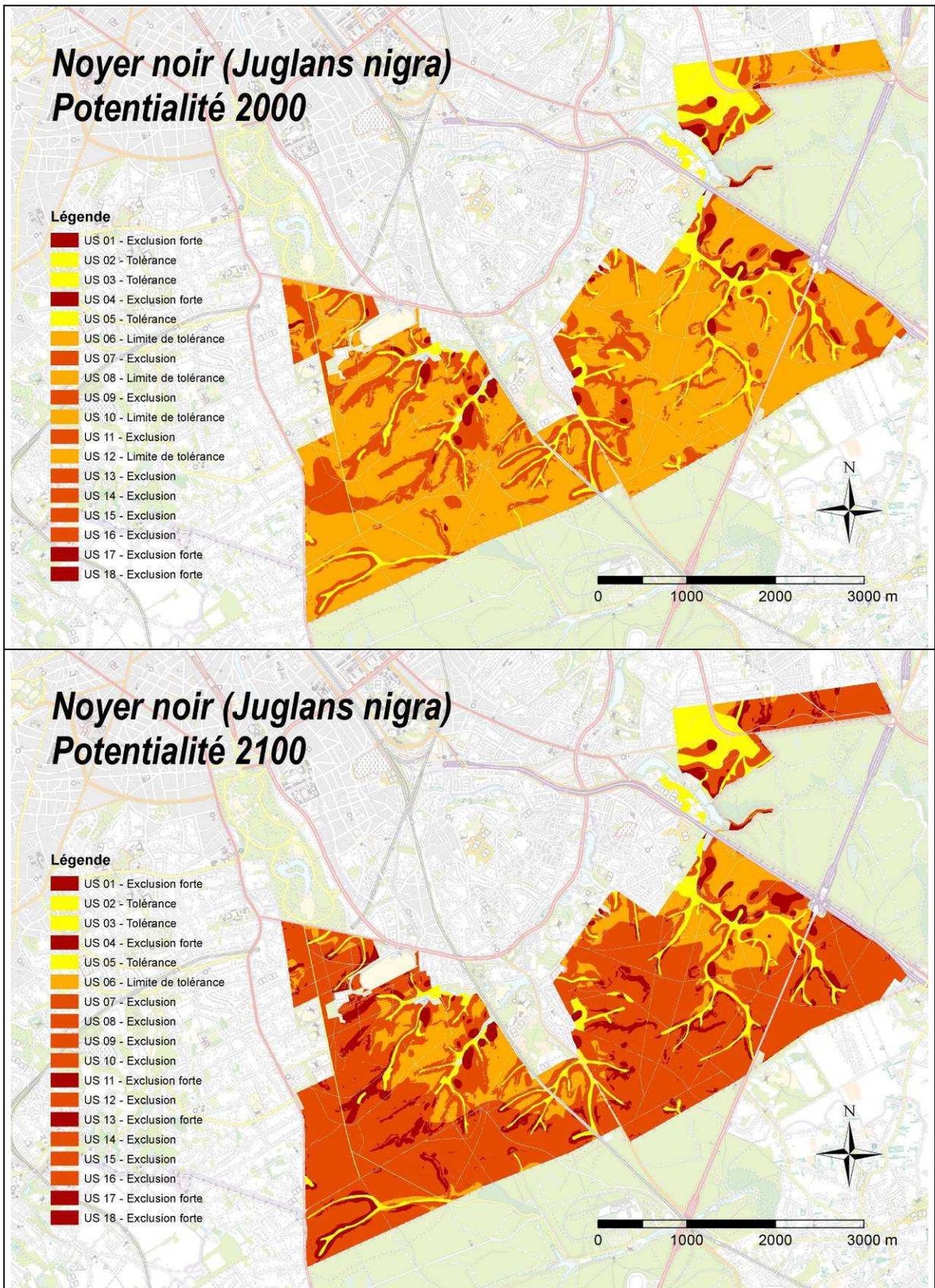


Figure 98 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le noyer noir d'Amérique.

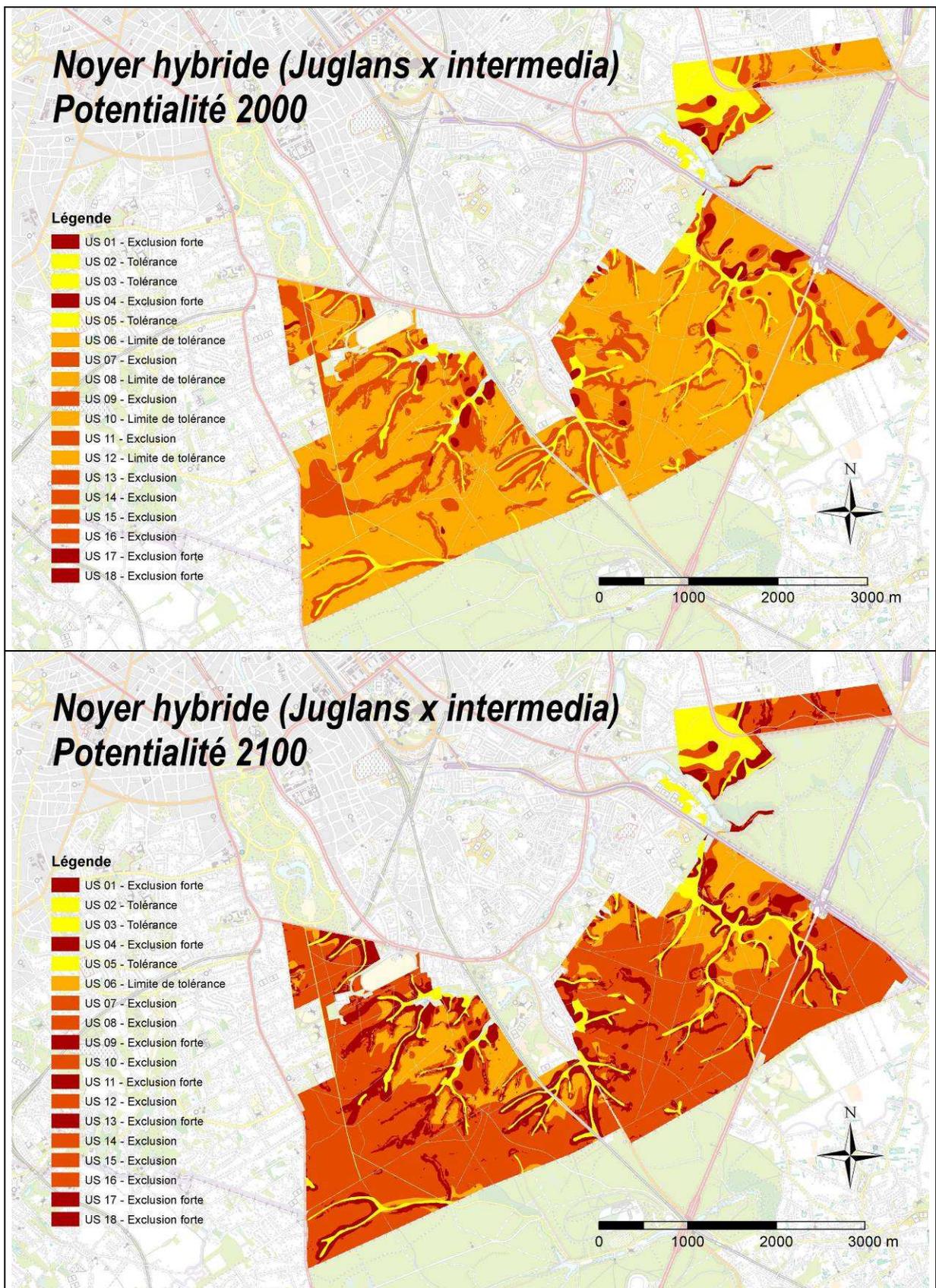


Figure 99 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le noyer hybride.

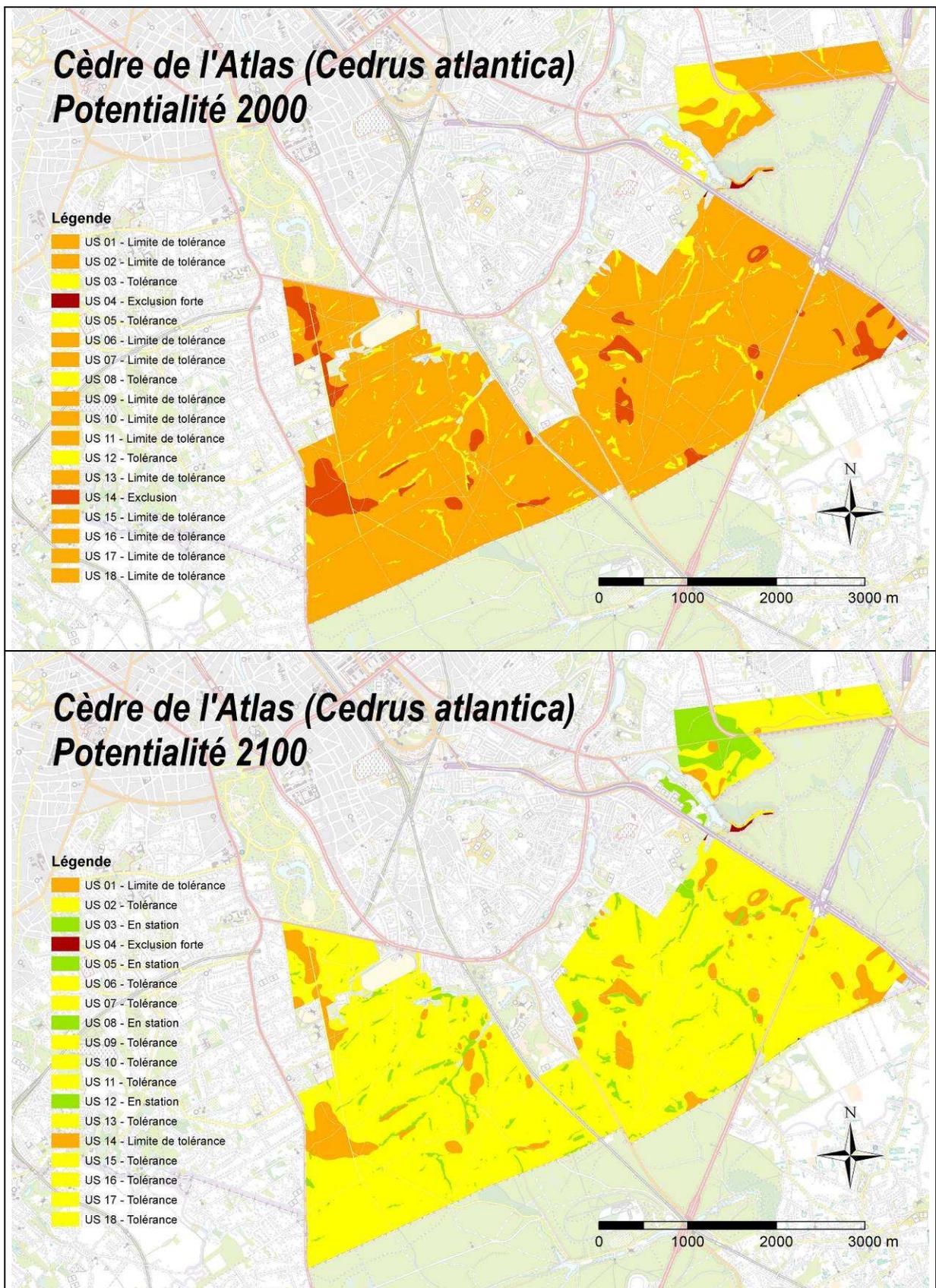


Figure 100 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le cèdre de l'Atlas.

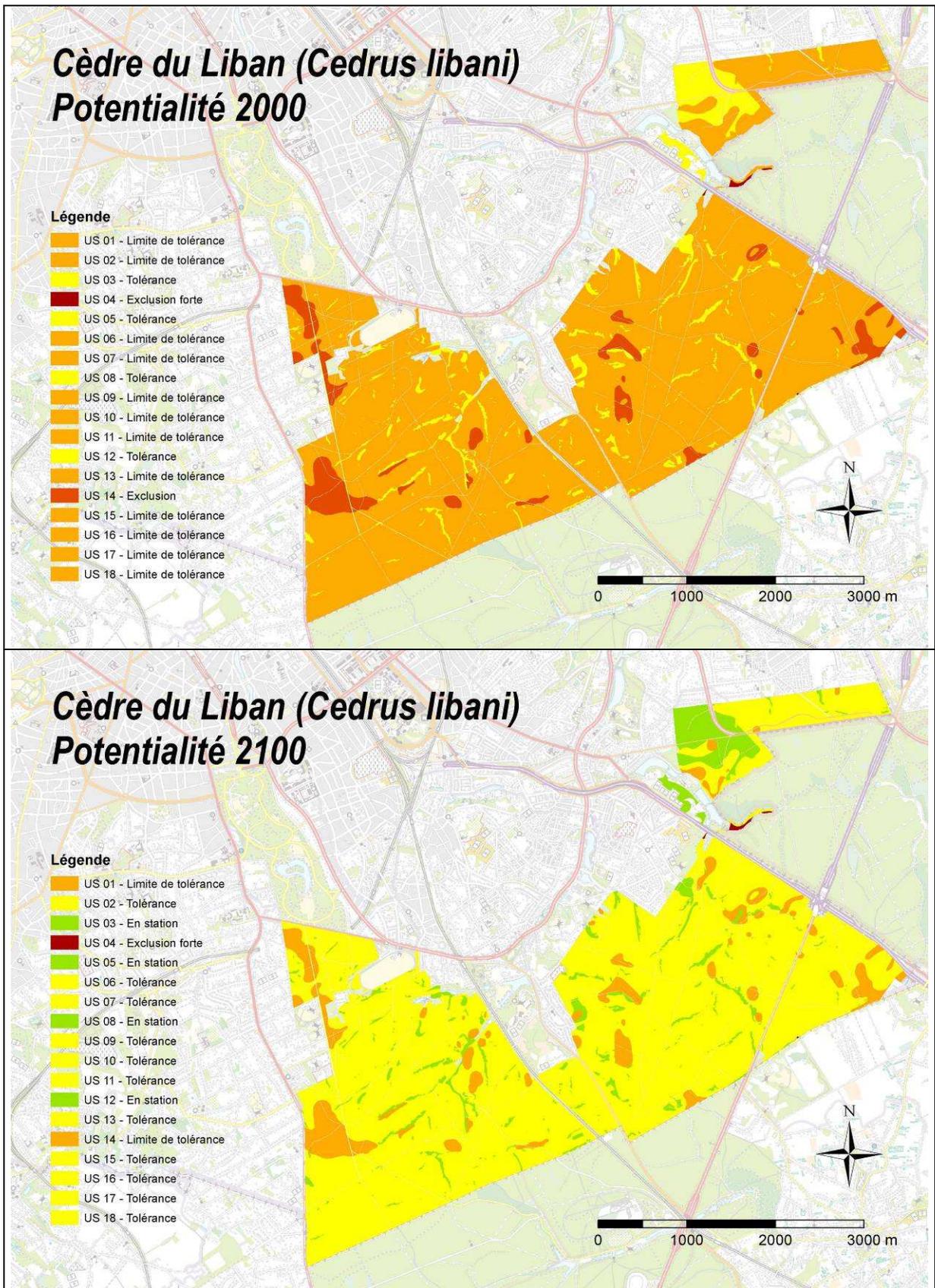


Figure 101 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le cèdre du Liban.

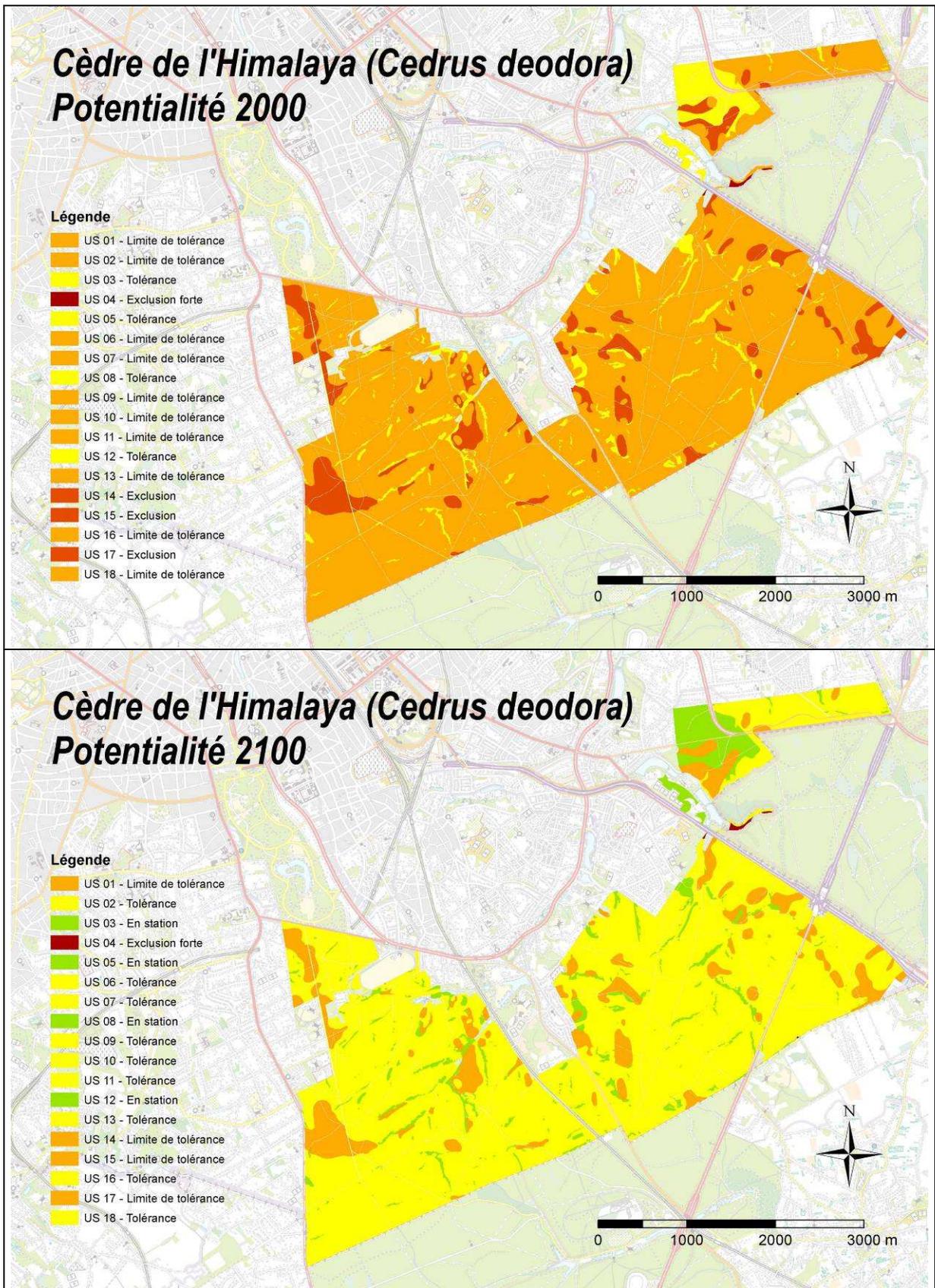


Figure 102 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le cèdre de l'Himalaya.

Extension de l'étude aux bois périphériques

Suivant la même méthodologie, la cartographie des bois périphériques se situant dans la Région de Bruxelles-Capitale a également été réalisée (figures pages suivantes). Les bois suivants sont concernés :

- Uccle (en haut sur les figures):
 - Bois de Verrewinkel (13 ha)
 - Bois du Buysdelle (5 ha)
 - Bois de la Chapelle Houwart (2,5 ha)
- Jette (en bas sur les figures):
 - Bois du Laerbeek (35 ha)
 - Bois de Dieleghem (12 ha)

Les zones non cartographiées correspondent à une pédologie remaniée pour laquelle une approche cartographique basée sur la carte des sols n'est pas envisageable.

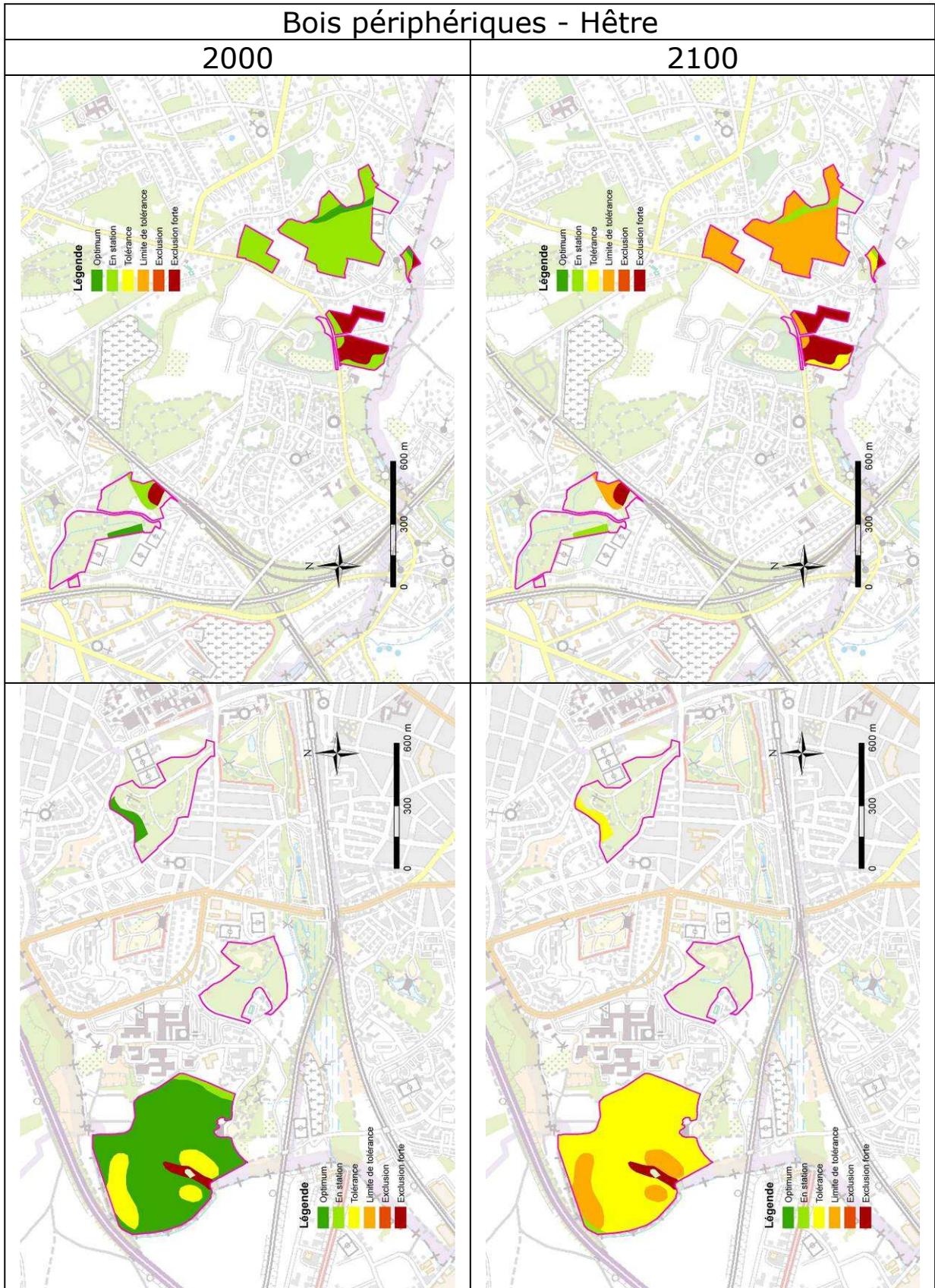


Figure 103 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le hêtre (bois périphériques)

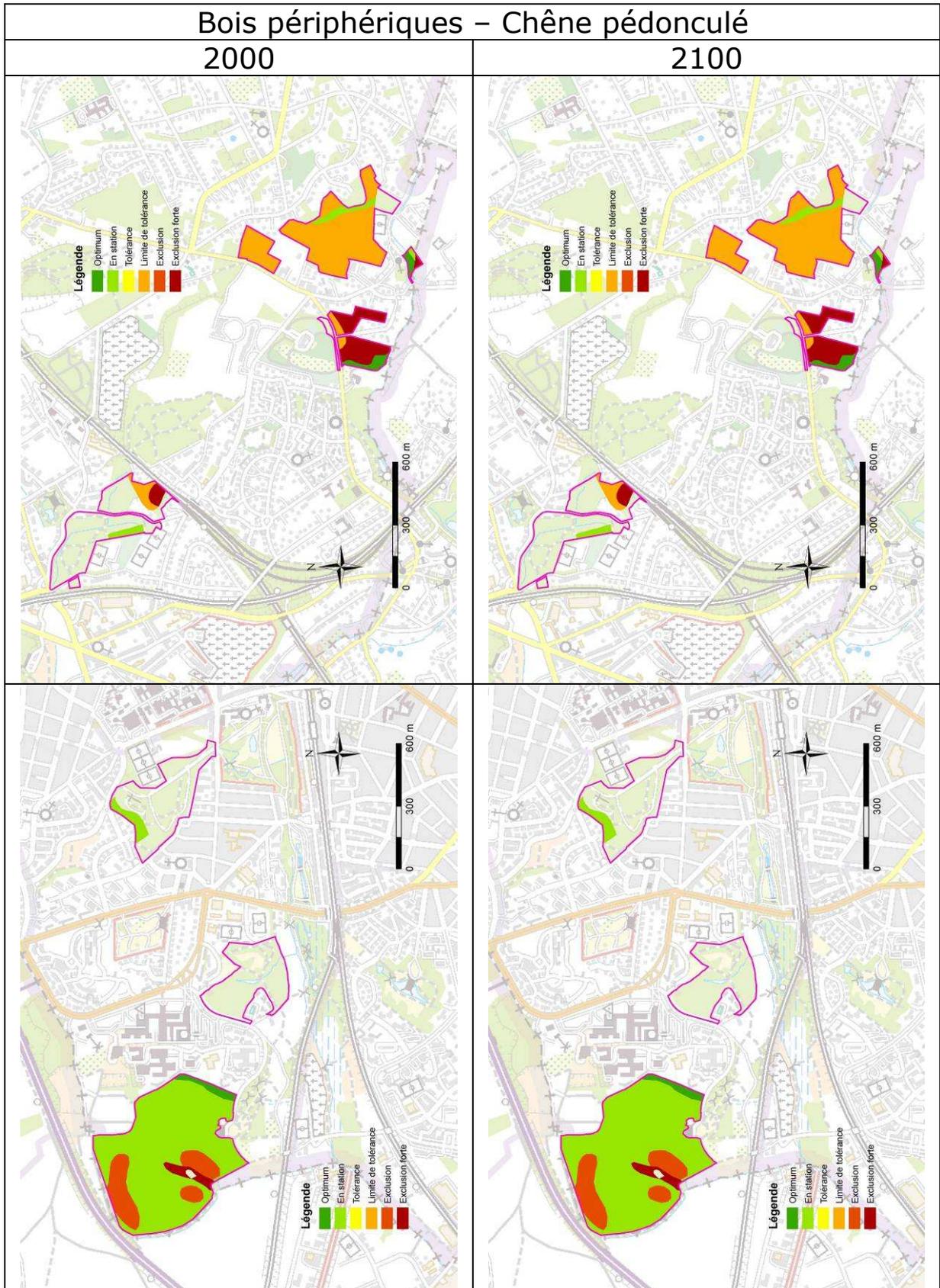


Figure 104 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le chêne pédonculé (bois périphériques).

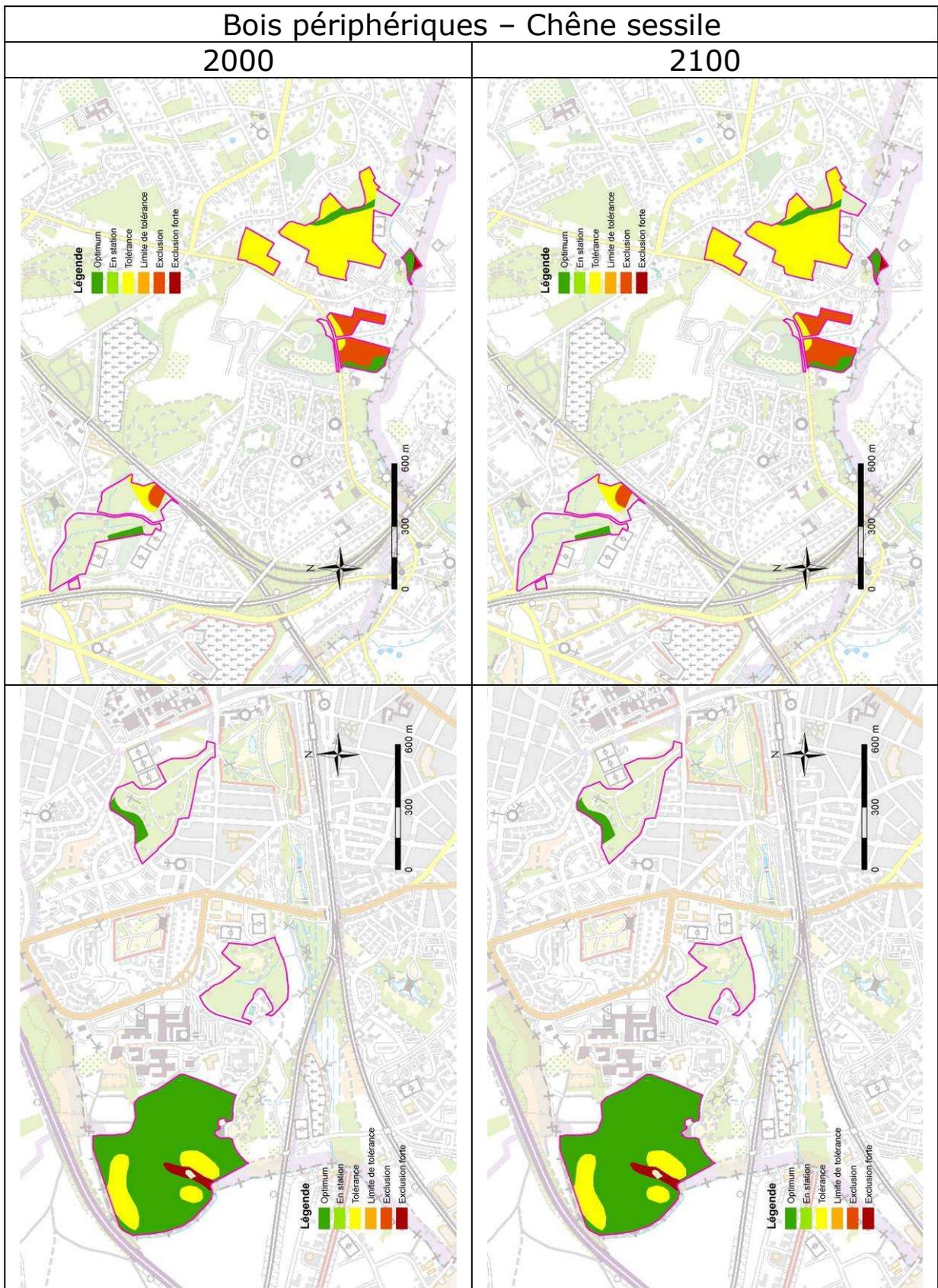


Figure 105 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le chêne sessile (bois périphériques).

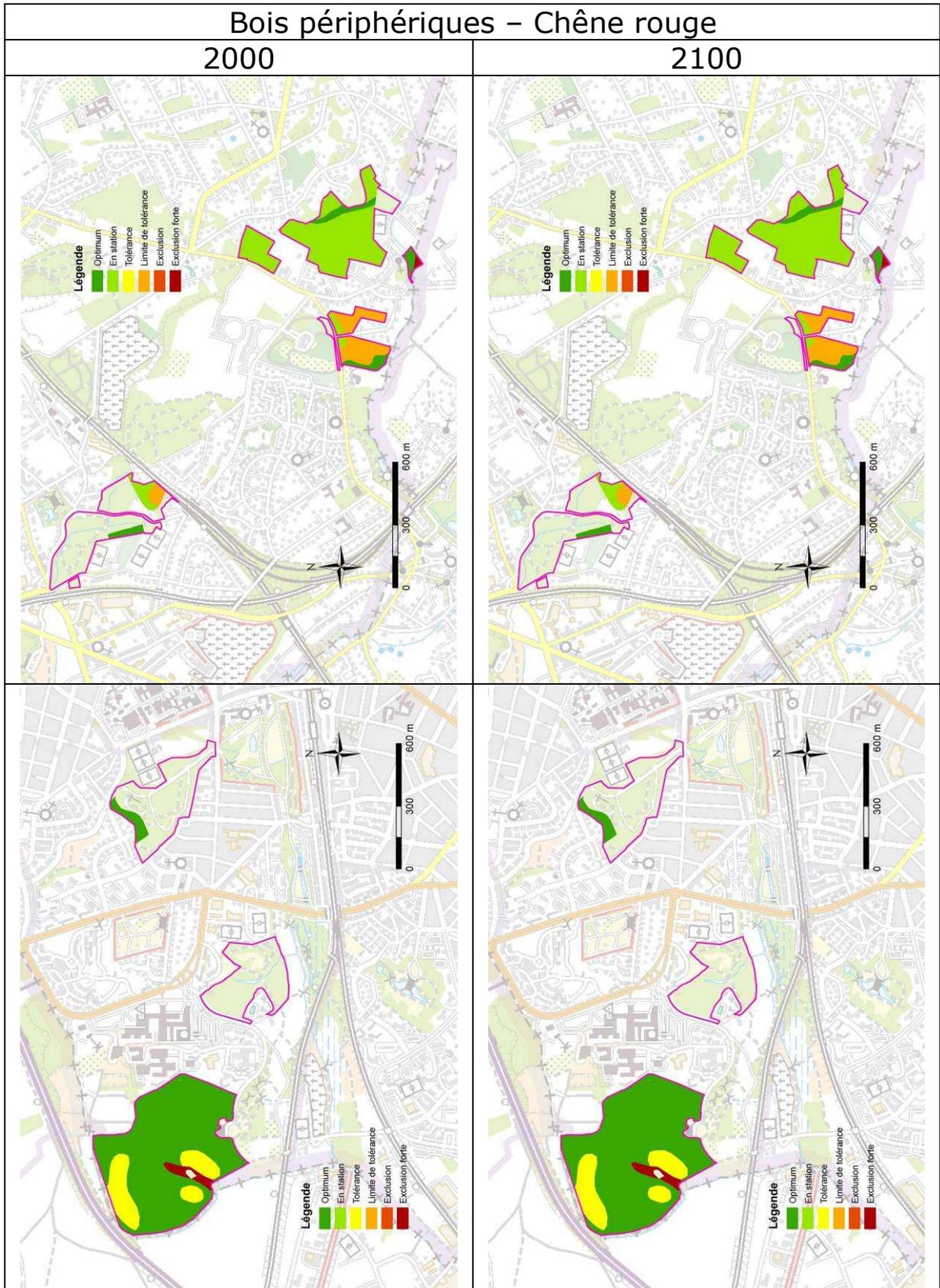


Figure 106 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le chêne rouge (bois périphériques).

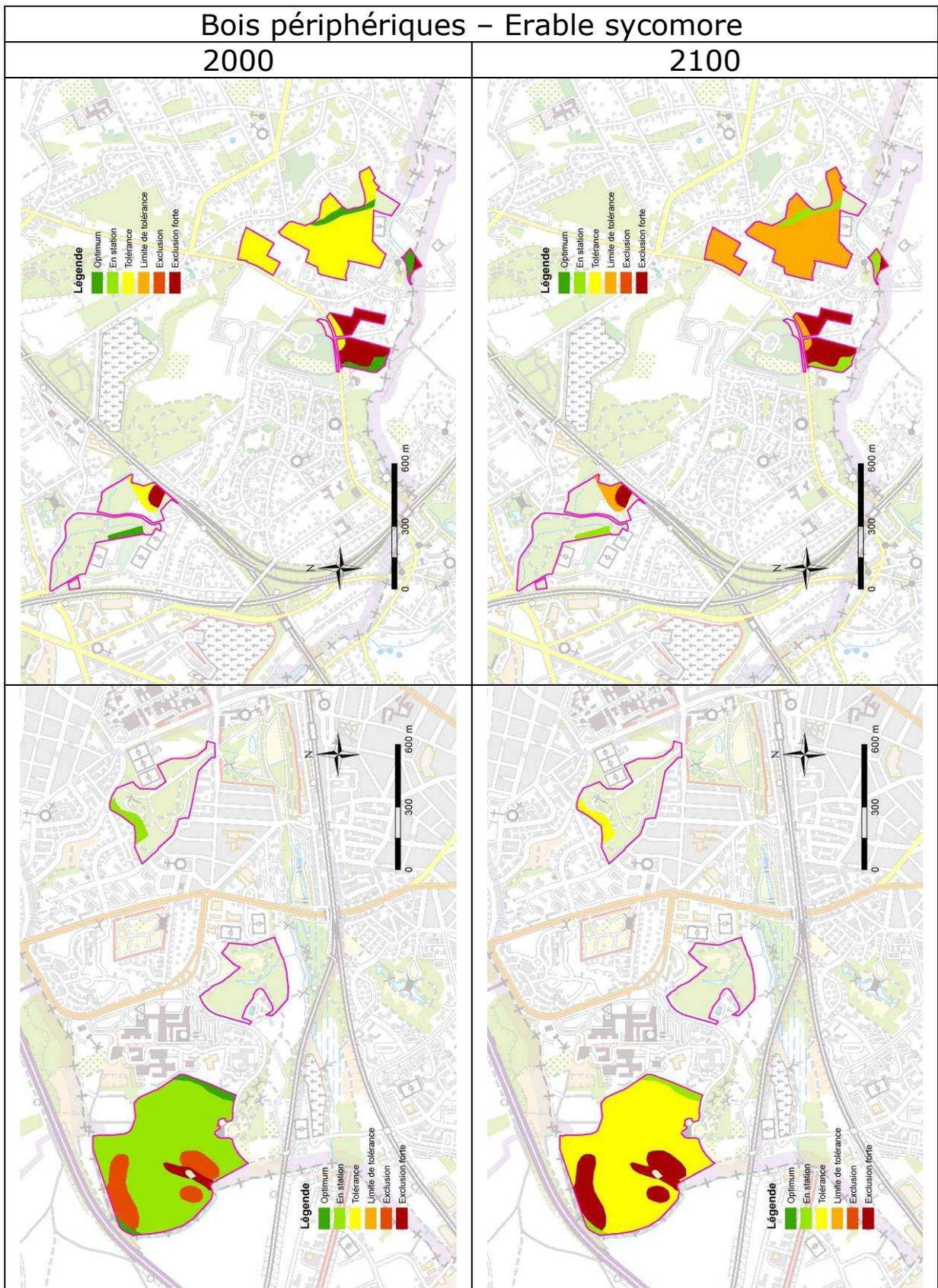


Figure 107 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour l'érable sycomore (bois périphériques).

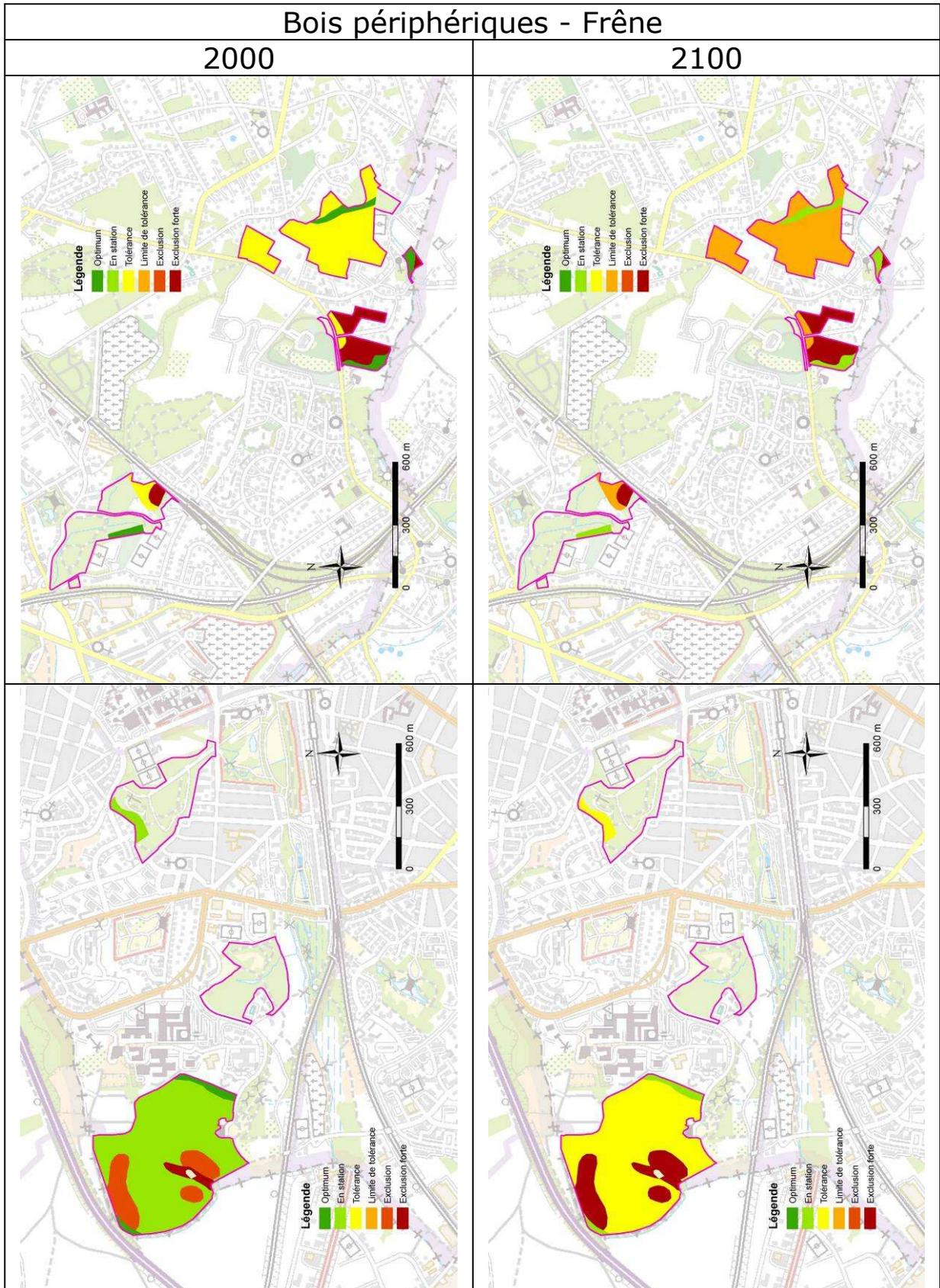


Figure 108 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le frêne (bois périphériques).

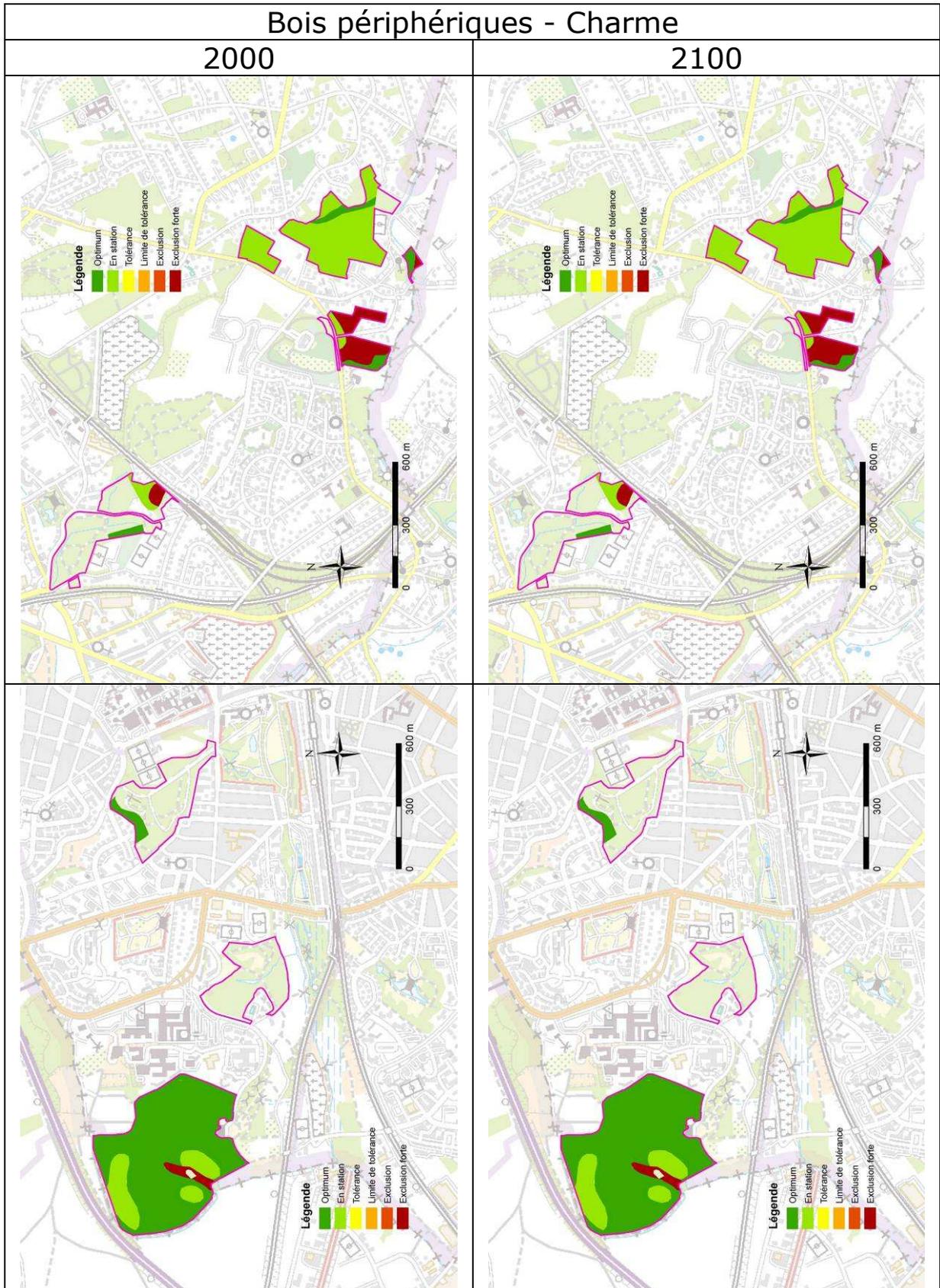


Figure 109 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le charme (bois périphériques).

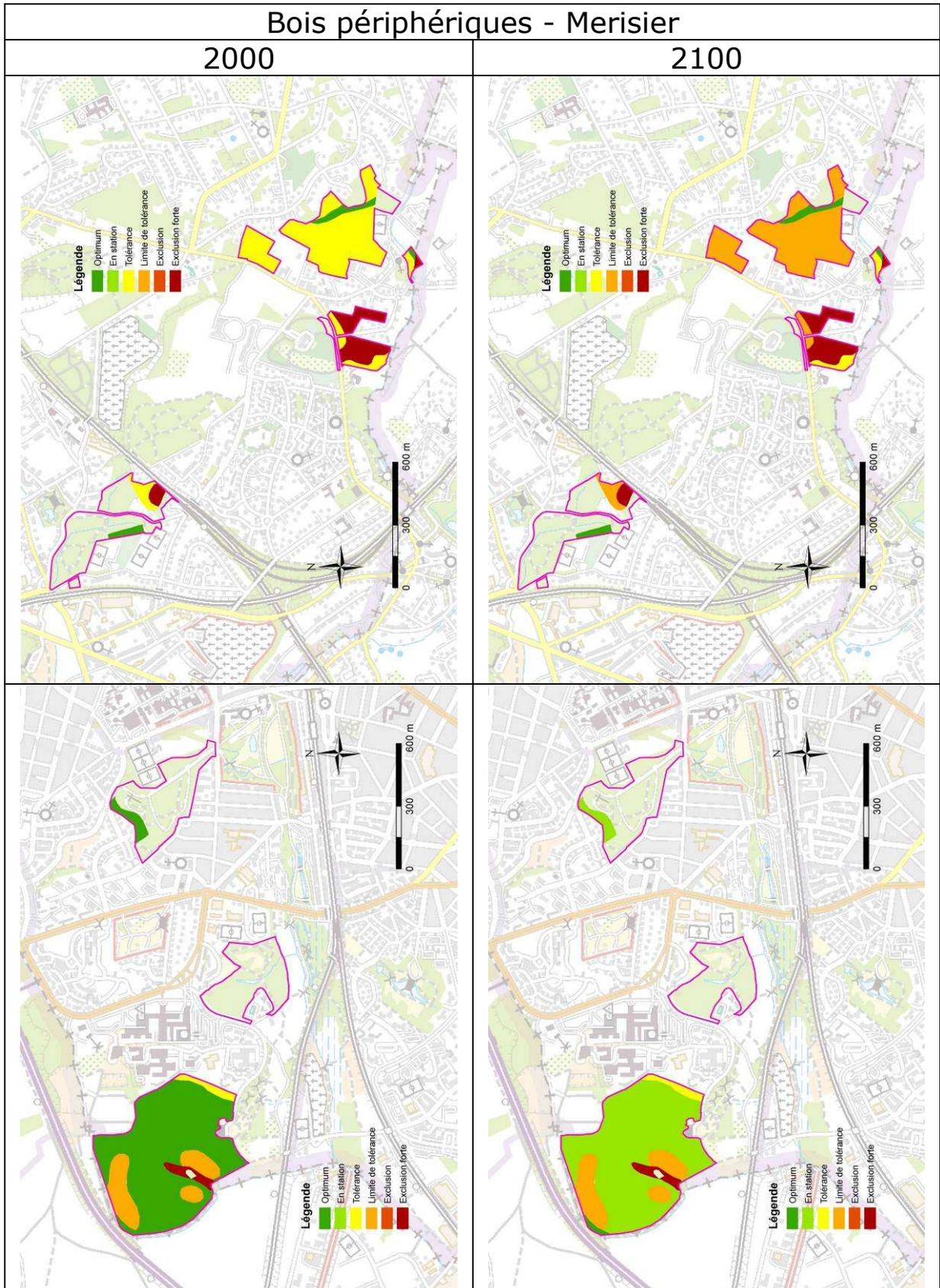


Figure 110 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le merisier (bois périphériques).

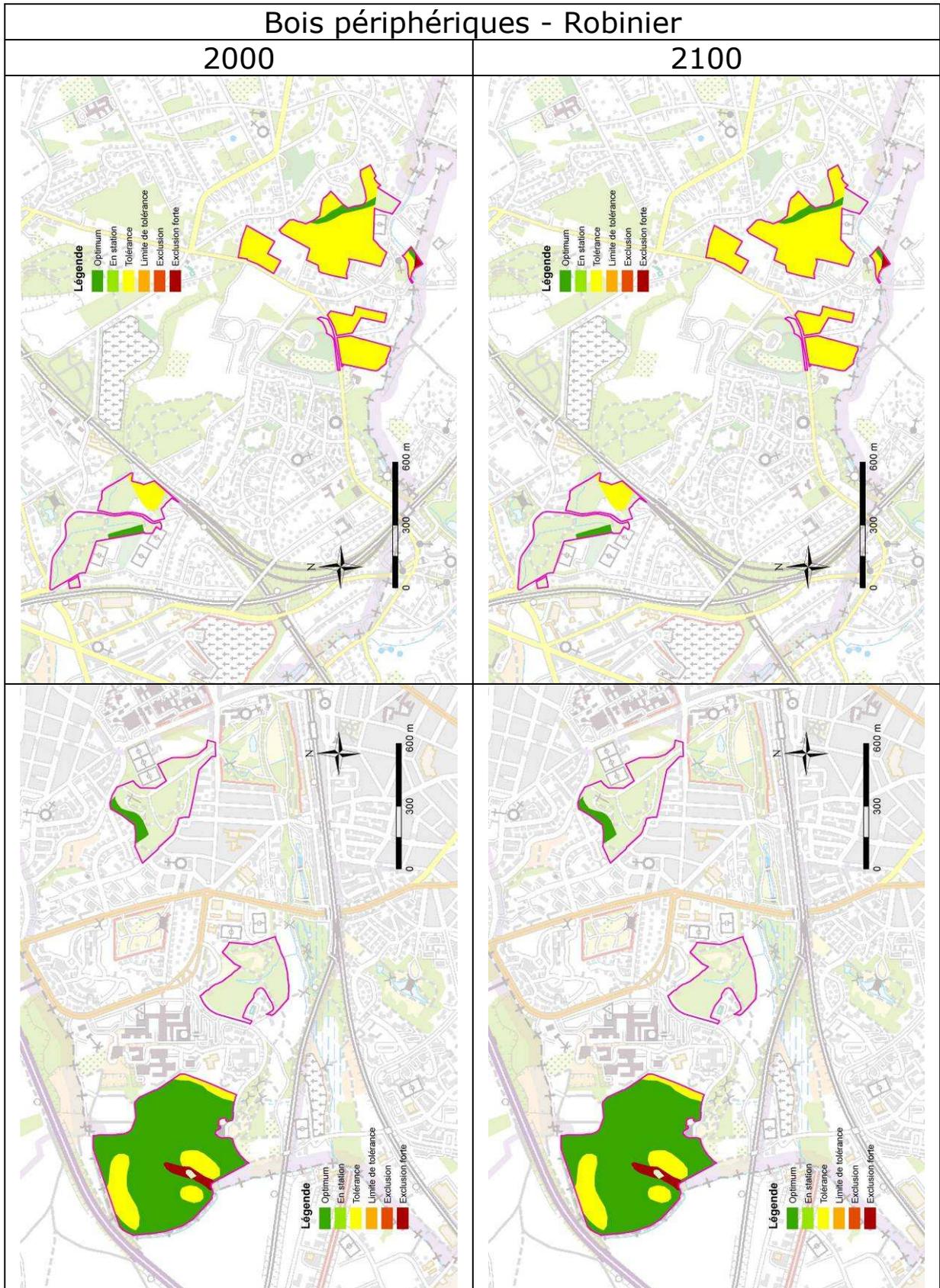


Figure 111 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le robinier (bois périphériques).

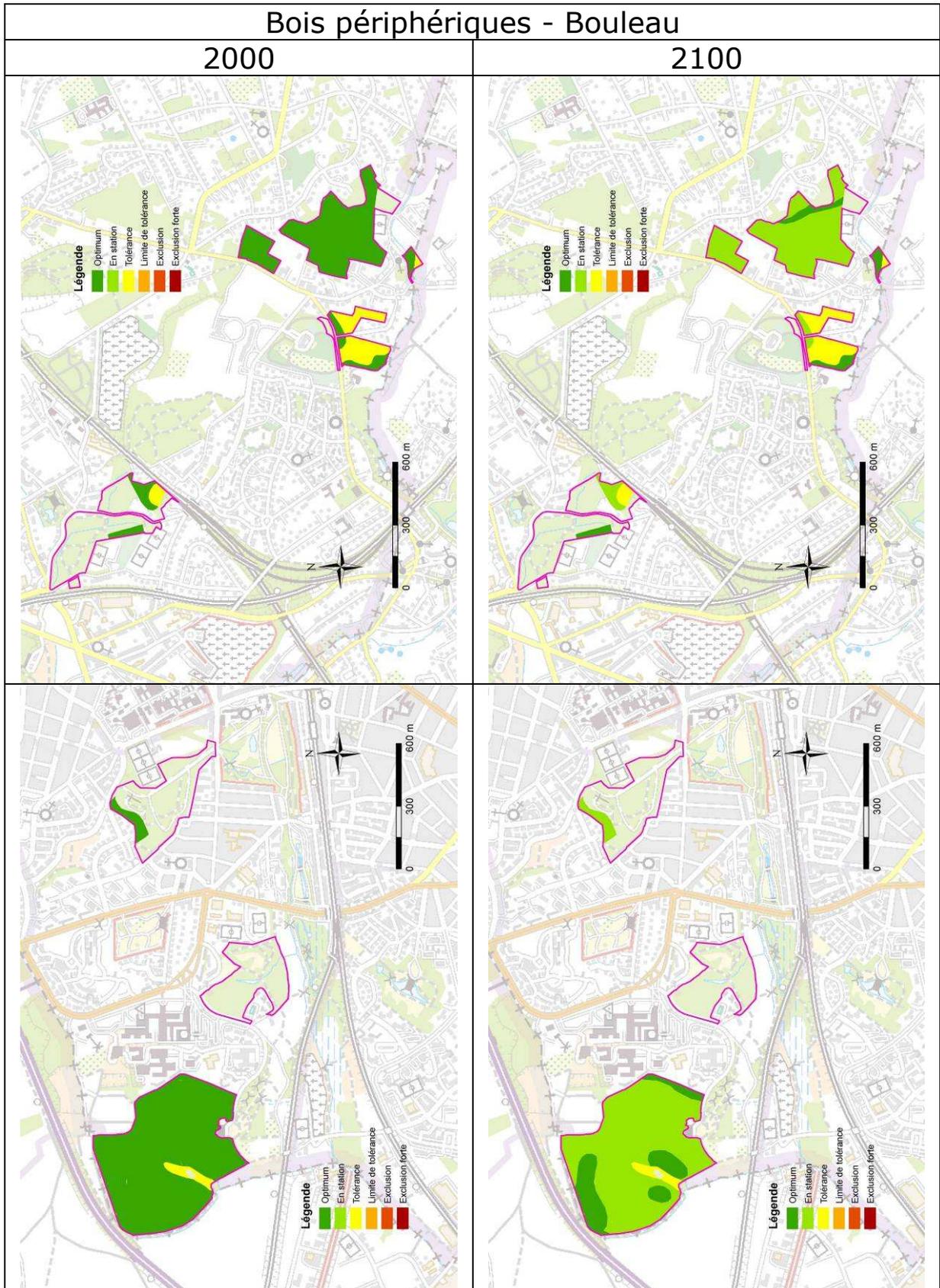


Figure 112 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le bouleau (bois périphériques).

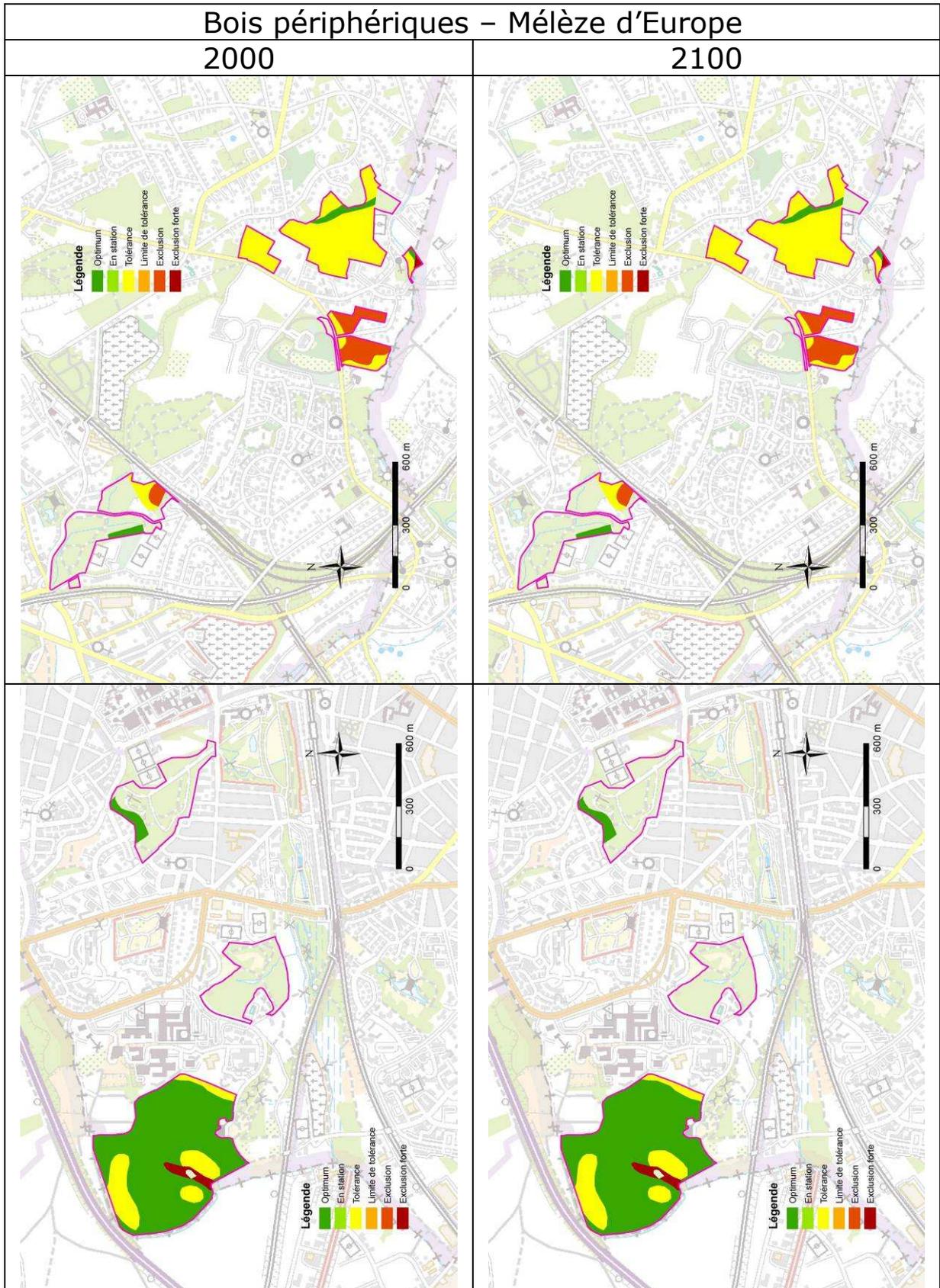


Figure 113 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le mélèze d'Europe (bois périphériques).

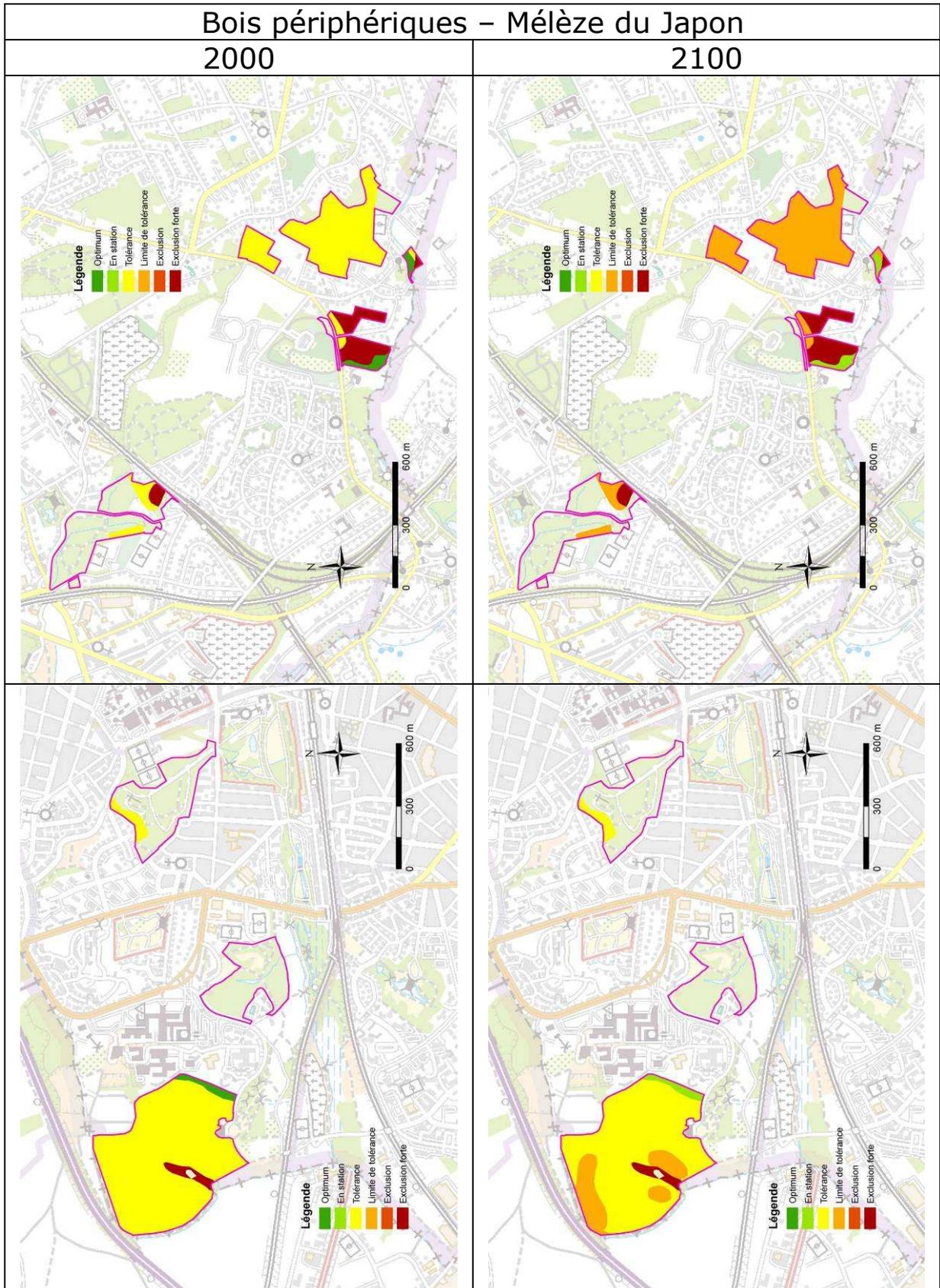


Figure 114 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le mélèze du Japon (bois périphériques).

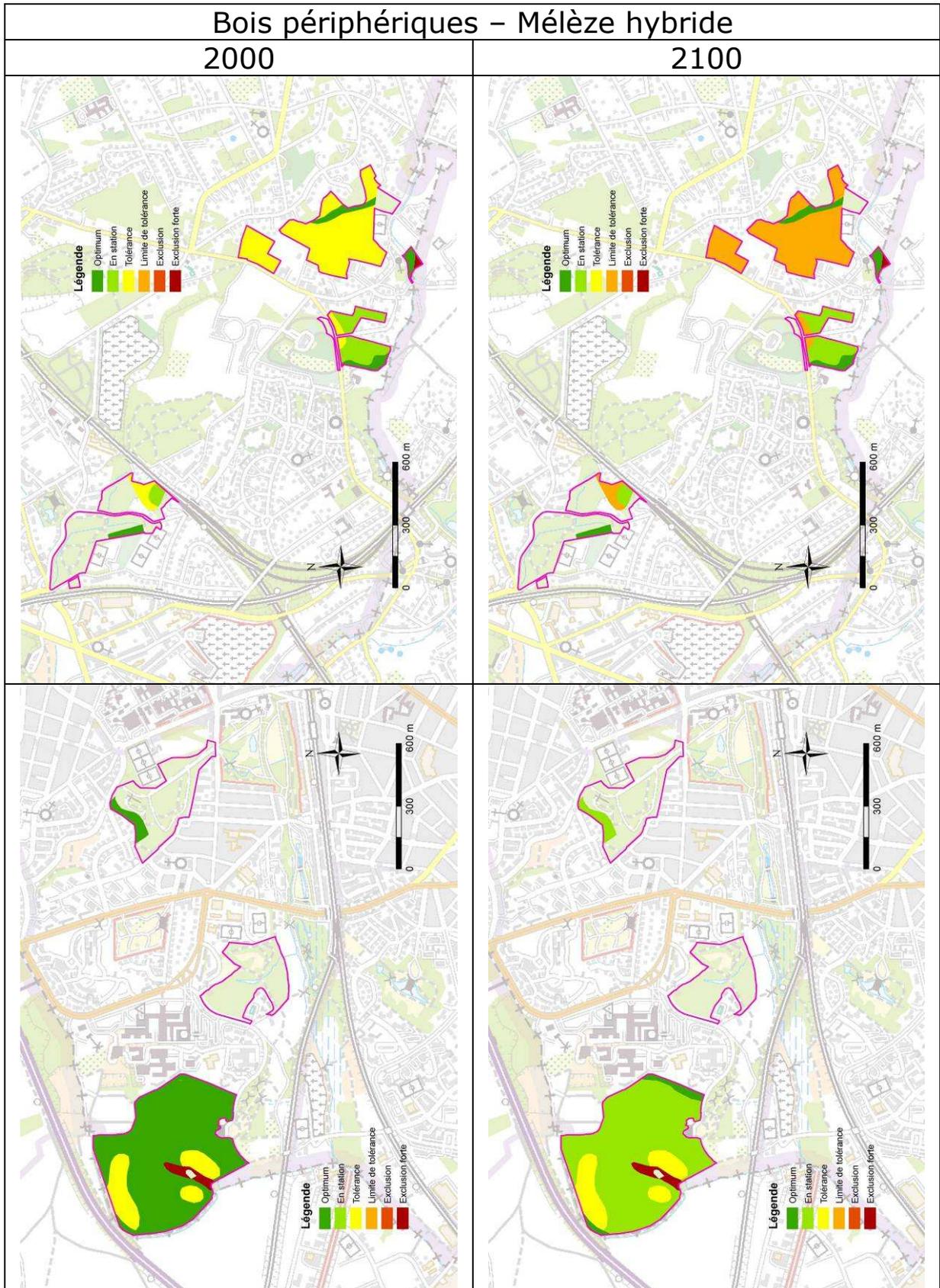


Figure 115 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le mélèze hybride (bois périphériques).

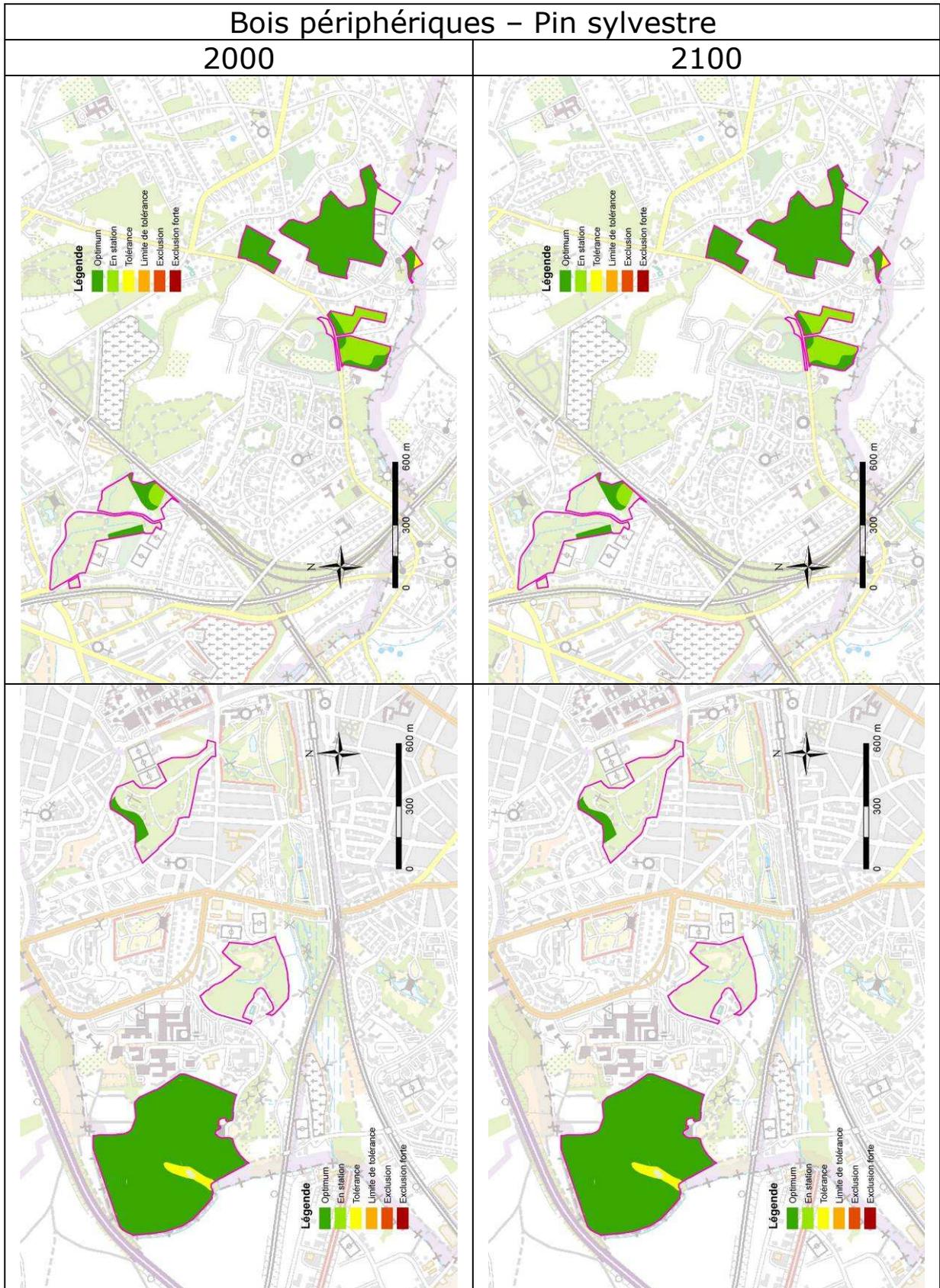


Figure 116 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le pin sylvestre (bois périphériques).

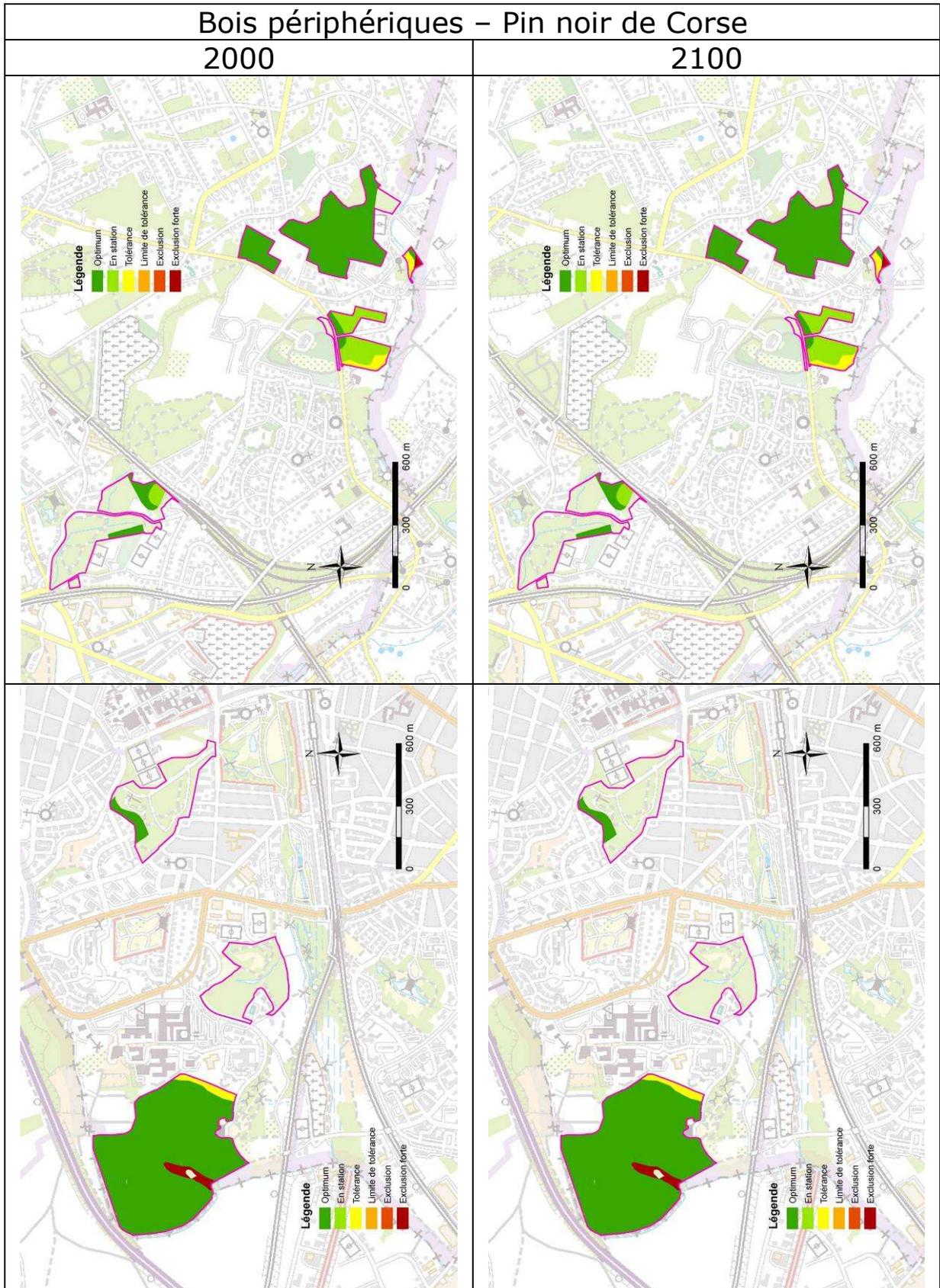


Figure 117 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le pin noir de Corse (bois périphériques).

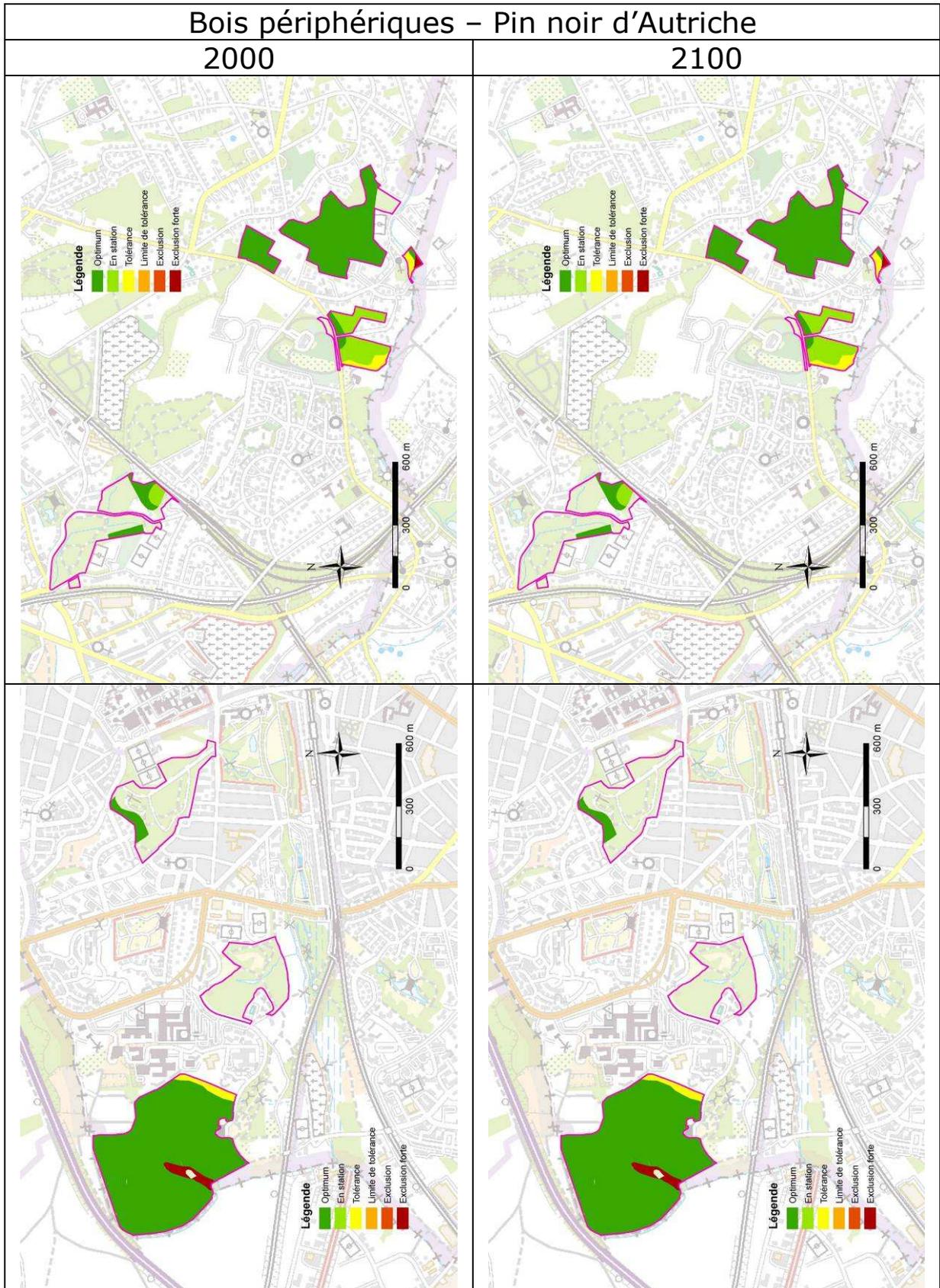


Figure 118 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le pin noir d'Autriche (bois périphériques).

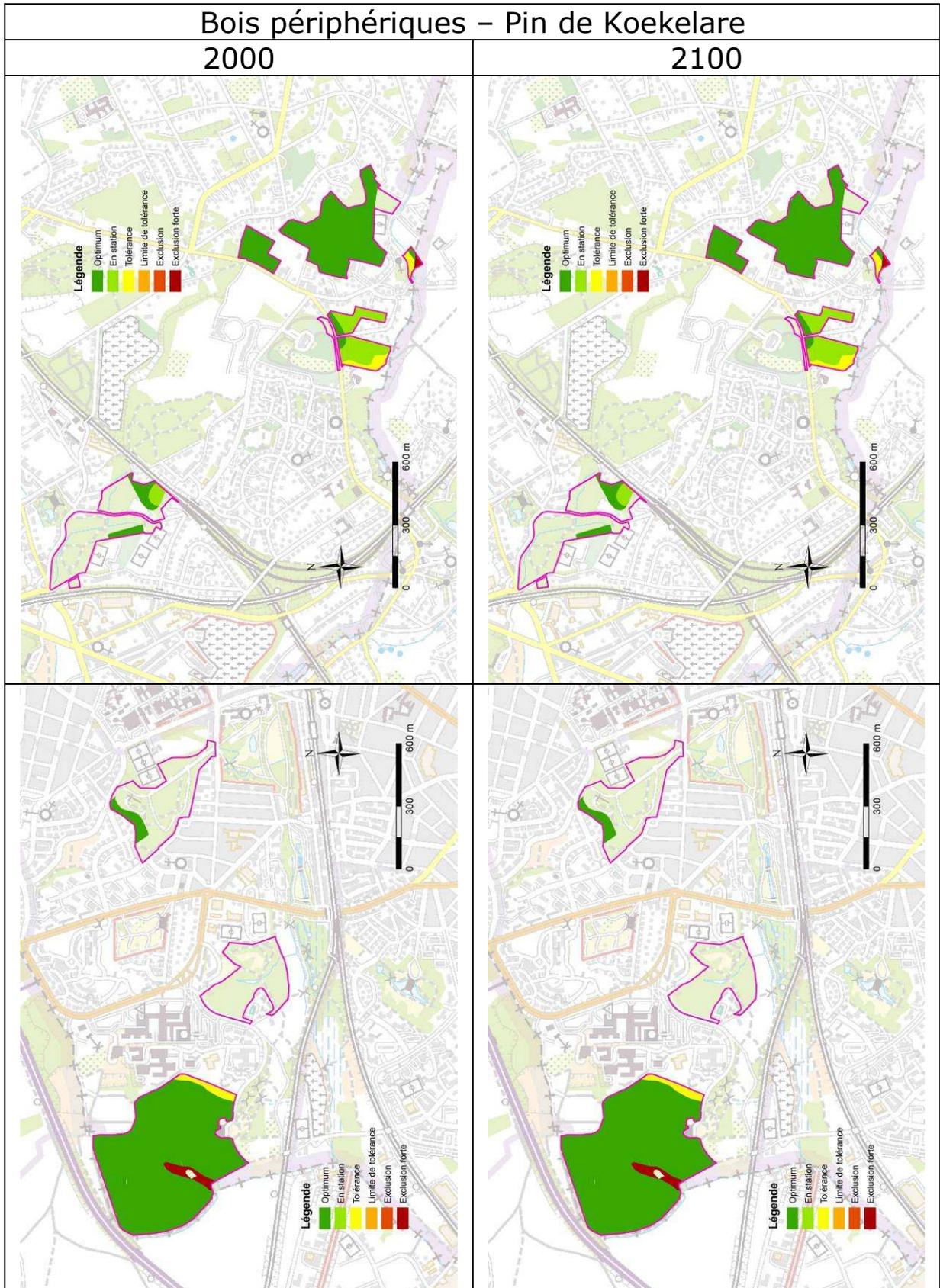


Figure 119 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le pin de Koekelare (bois périphériques).

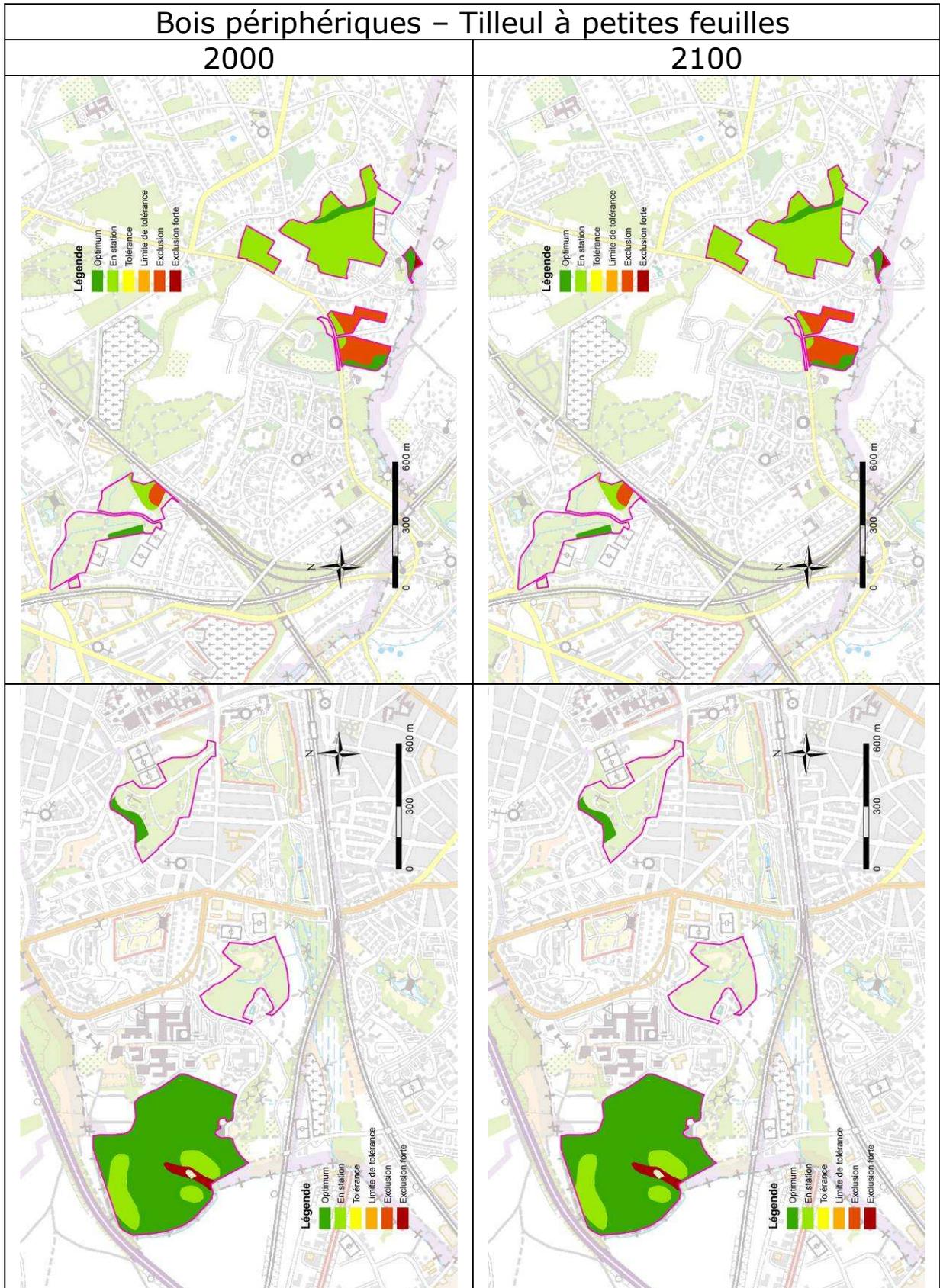


Figure 120 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le tilleul à petites feuilles (bois périphériques).



Figure 121 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le tilleul à grandes feuilles (bois périphériques).

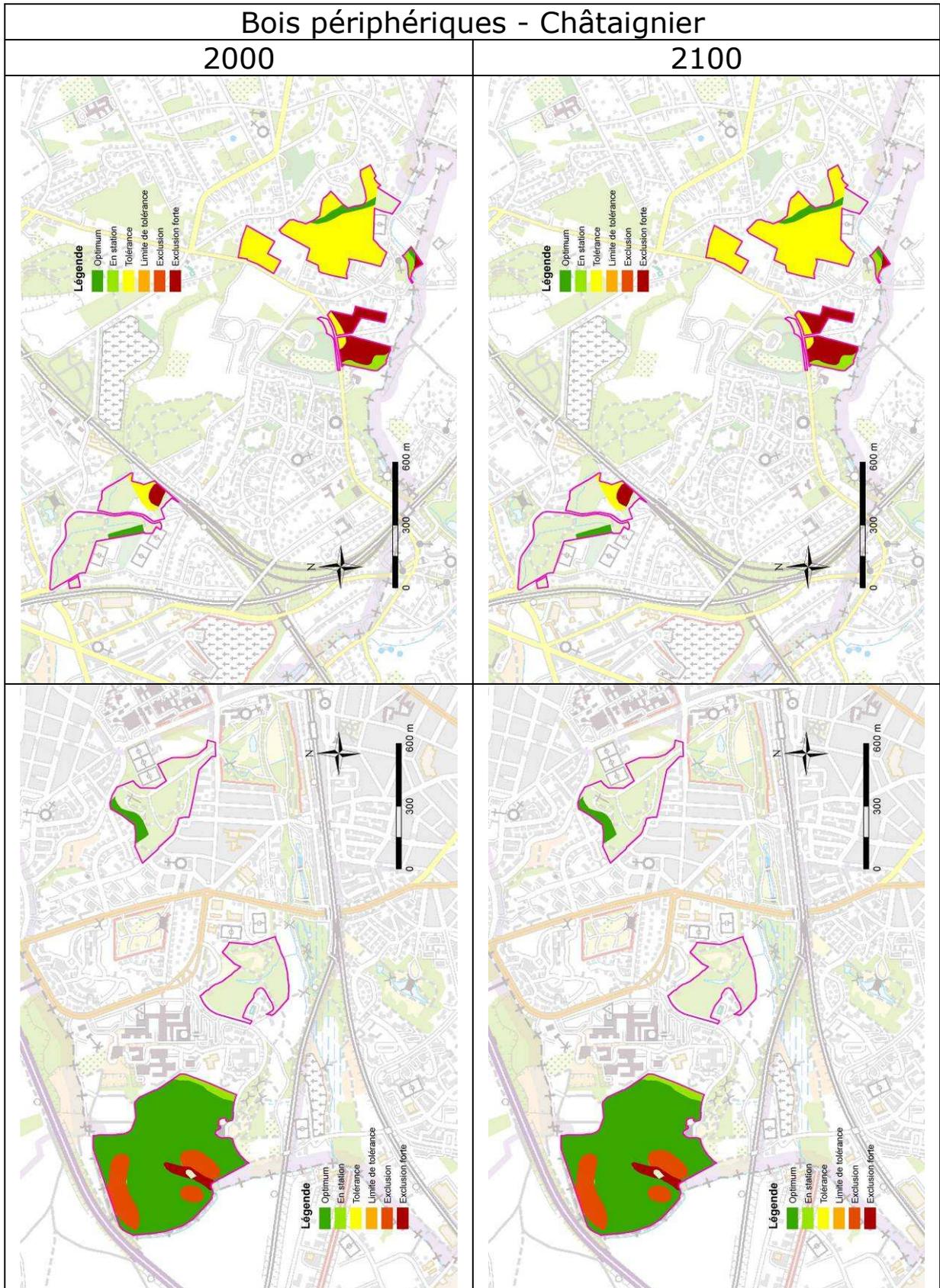


Figure 122 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le châtaignier (bois périphériques).

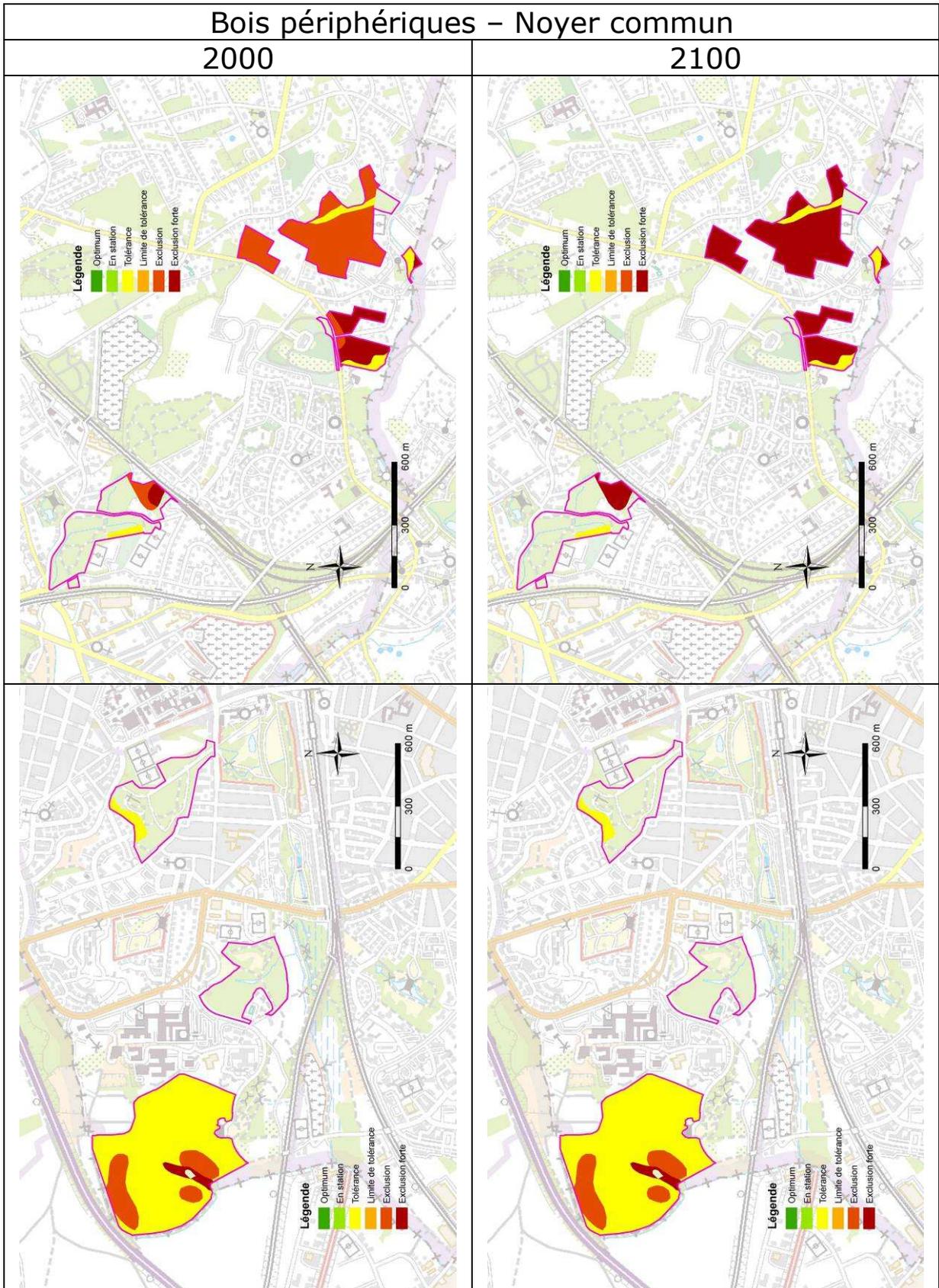


Figure 123 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le noyer commun (bois périphériques).

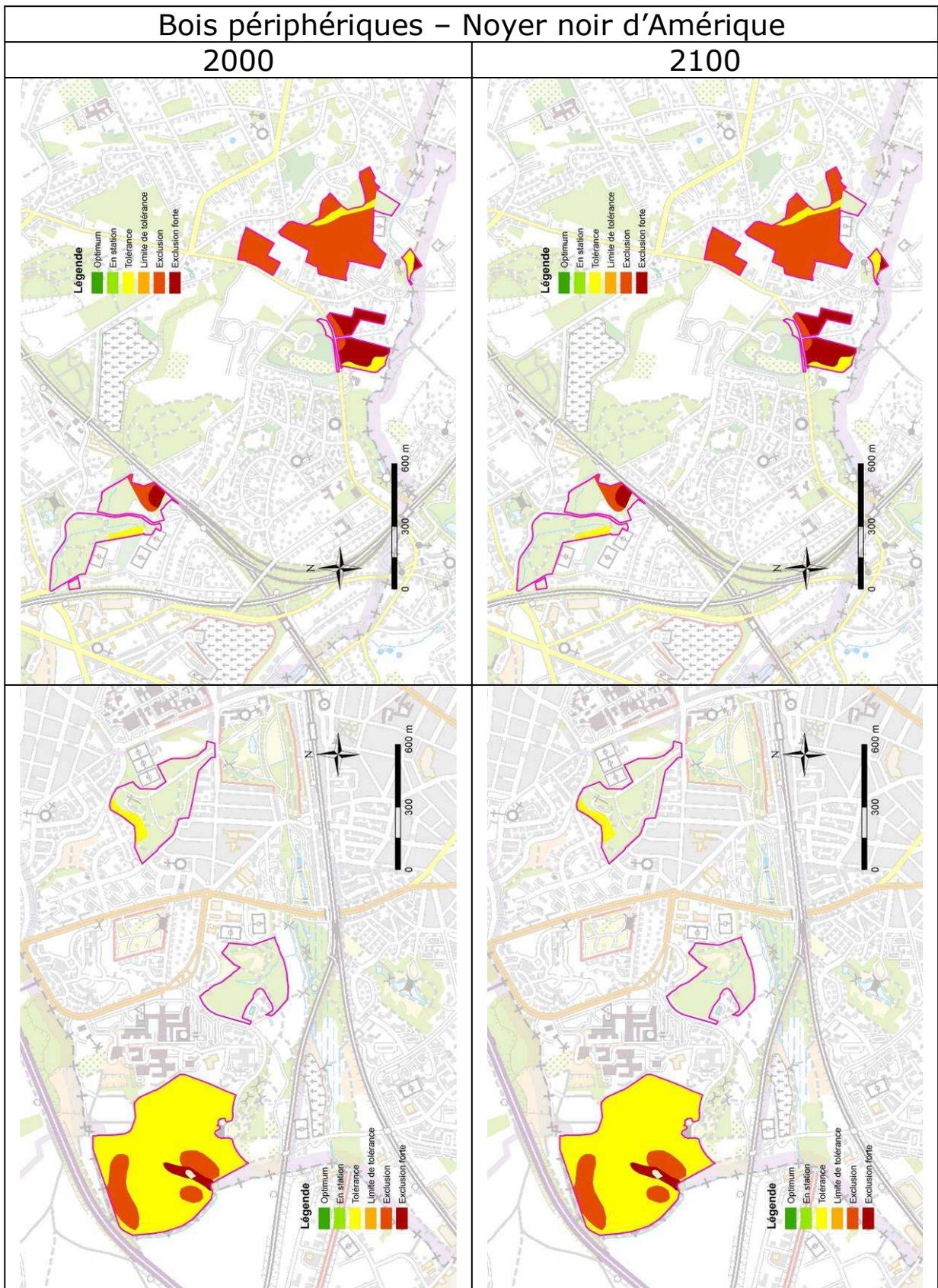


Figure 124 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le noyer noir d'Amérique (bois périphériques).

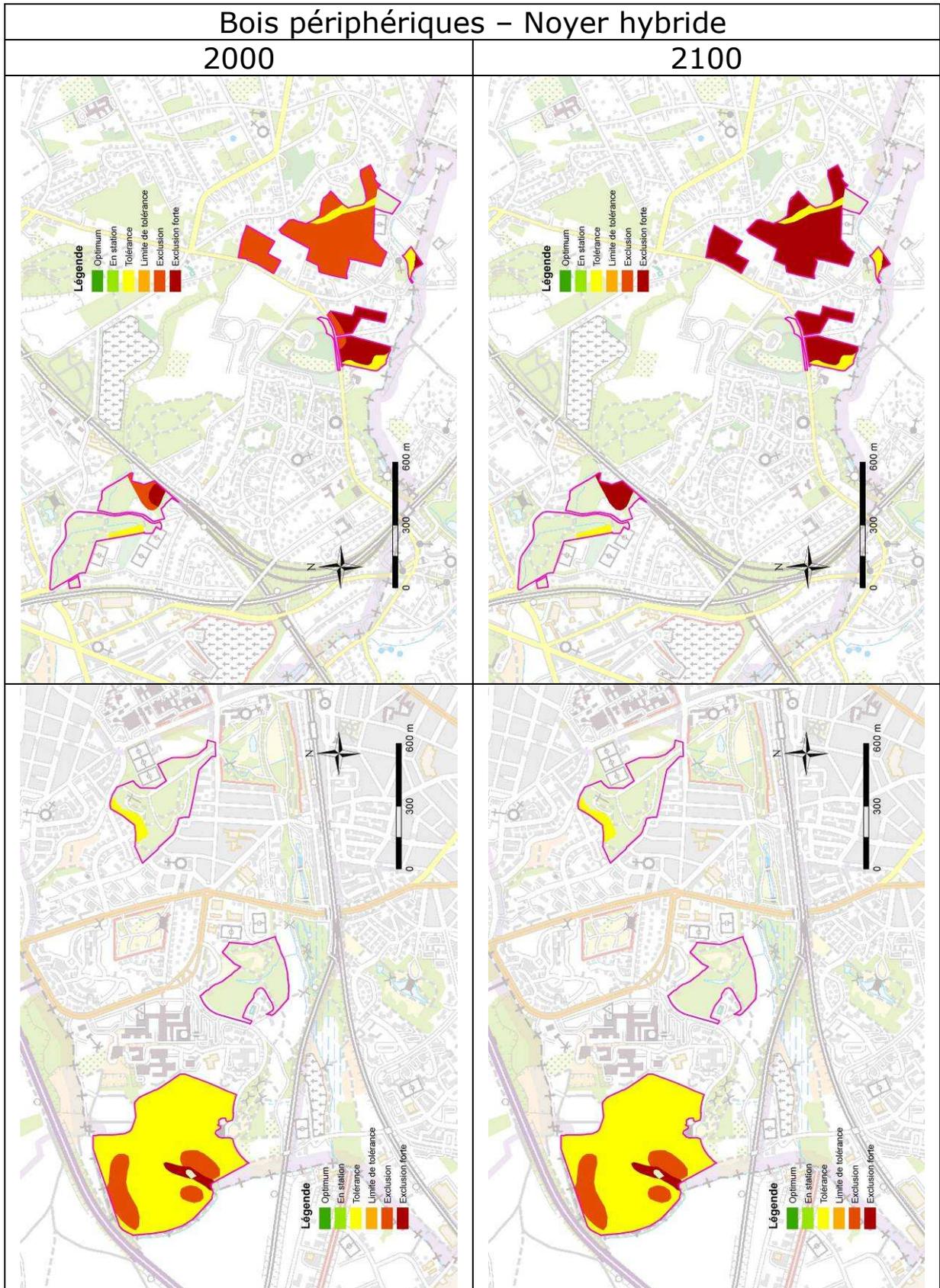


Figure 125 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le noyer hybride (bois périphériques).

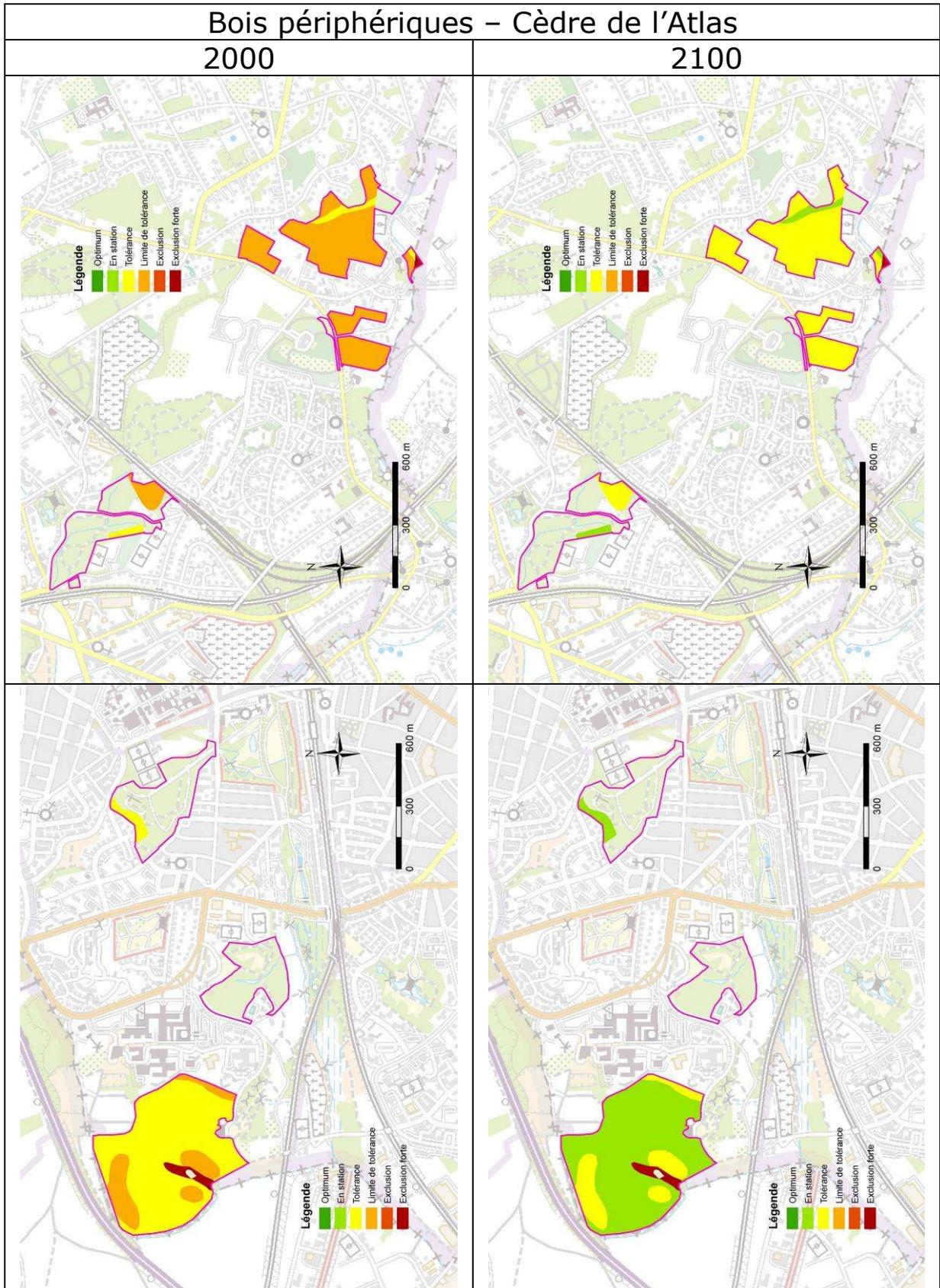


Figure 126 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le cèdre de l'Atlas (bois périphériques).

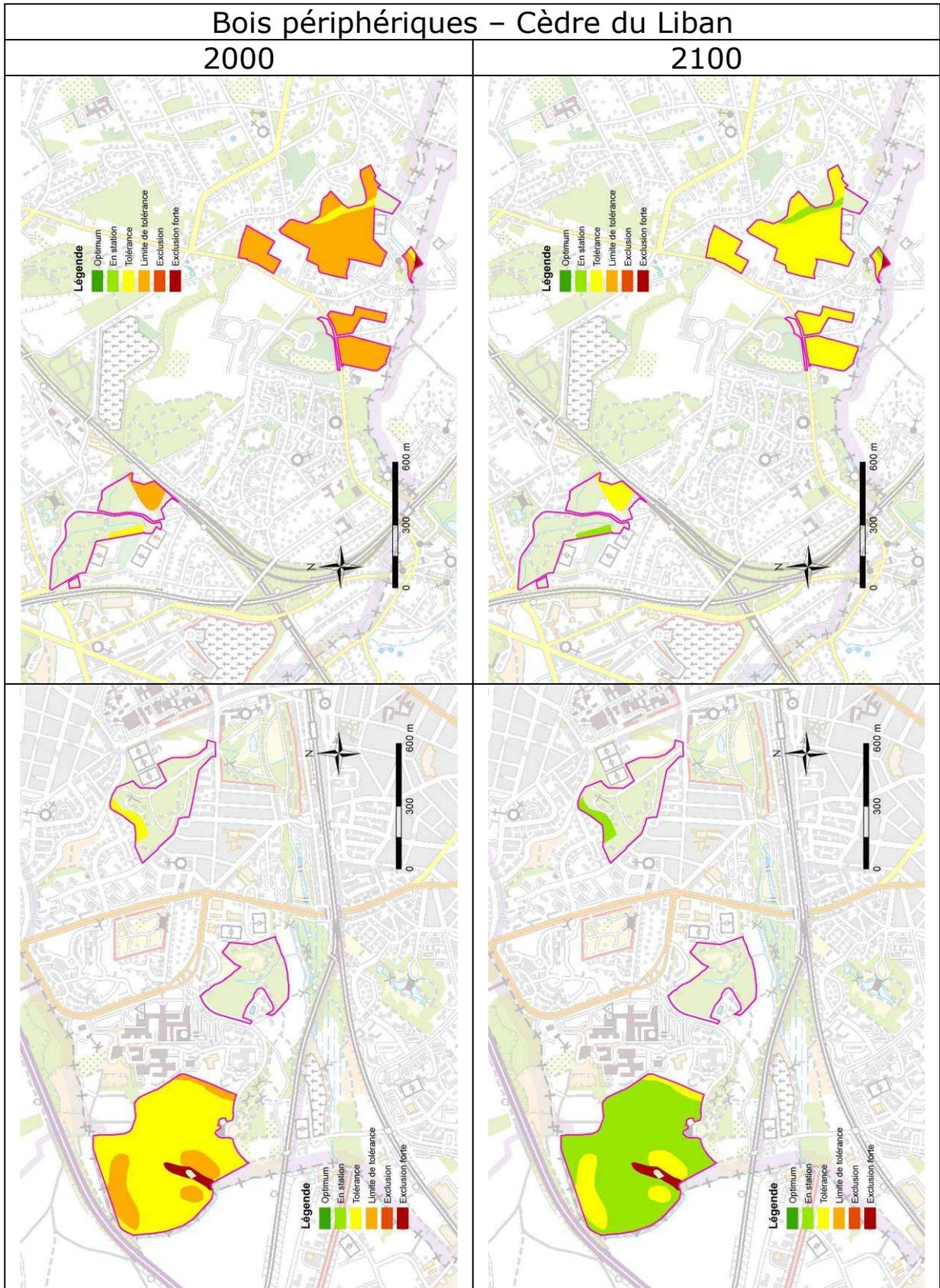


Figure 127 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le cèdre du Liban (bois périphériques).

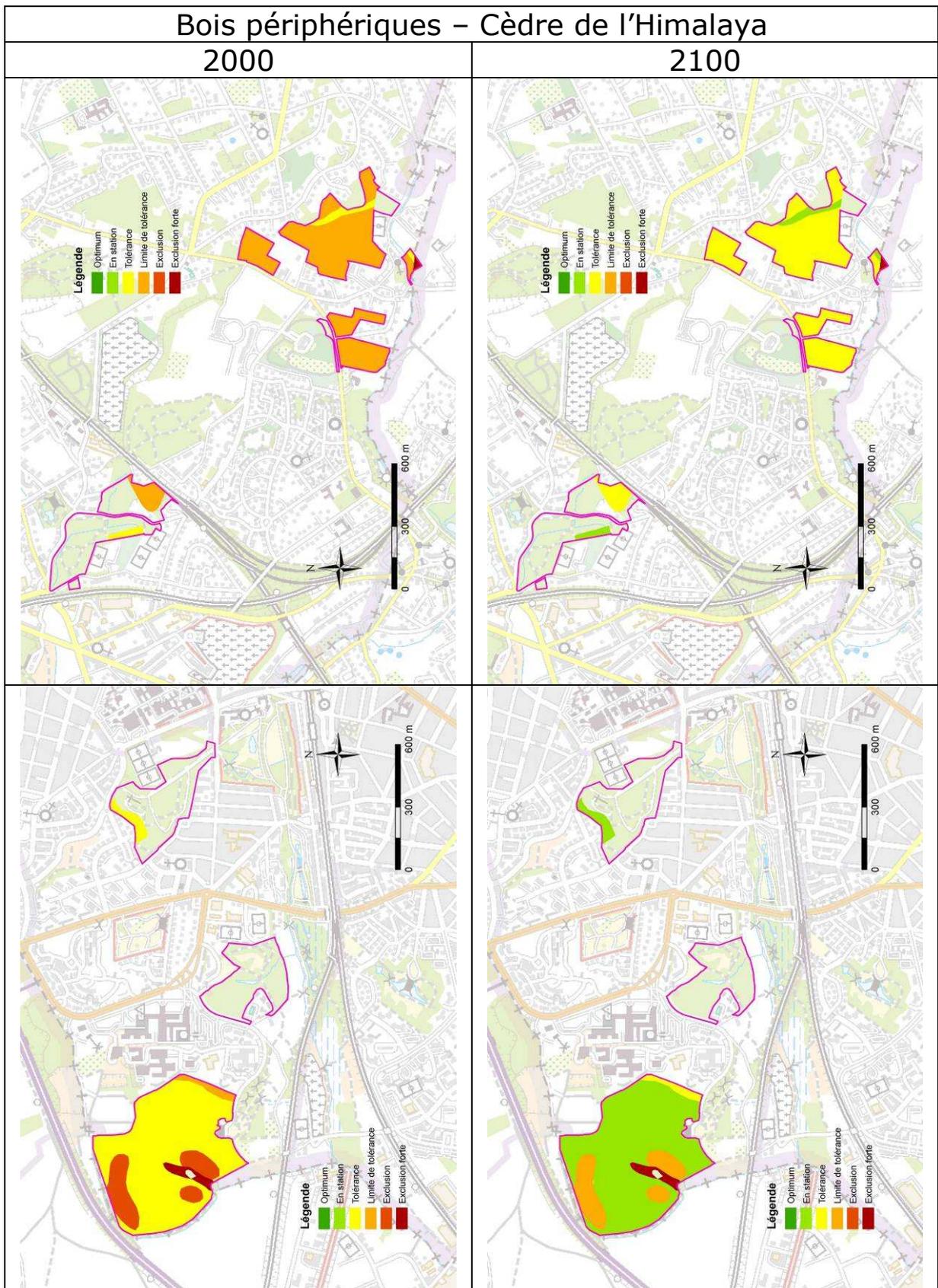


Figure 128 - Aptitude sylvicole actuelle et prévision de l'aptitude sylvicole pour 2100 pour le cèdre de l'Himalaya (bois périphériques).

Chapitre 11. Questions diverses

Plusieurs questions se sont également posées lors de l'étude et constituent autant de perspectives. N'ayant pu les traiter au cours de la convention, nous les avons rassemblées dans ce chapitre.

11.1. Existe-t-il une corrélation entre les dépérissements observés et les types de station ?

L'idée de cette question annexe est de confronter le jeu de données « dépérissement » avec les types de station. Le jeu de données provient d'un inventaire réalisé entre 2003 et 2005 par le Centre de Développement Agroforestier de Chimay. Cet inventaire concernait les peuplements composés majoritairement en hêtre (G > 50 %).

Le protocole suivi est le protocole de mesure des états sanitaires, protocole DEPEFEU (évaluation de l'aspect des houppiers (Tableau 35)). L'état sanitaire de 404 hêtres a été ainsi mesuré selon un échantillonnage réparti sur l'ensemble de la zone bruxelloise de la forêt de Soignes. L'échantillonnage compte 138 placettes avec un maximum de 3 arbres évalués par placette.

Tableau 35- Descriptif de la grille d'évaluation sanitaire du protocole DEPEFEU.

CRITERES	Classe 0	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Rameaux morts	Non	Oui	Oui	Oui	MORT
Branches mortes	Non	Non	< 50 %	> 50 %	
Transparence	Non	Légère	Moyenne	Forte	
Echancrures	Non	Non	Oui	Oui	
Fenêtres	Non	Oui	Oui	Oui	
Perte de ramification	Non	Légère	Moyenne	> 50 %	
Rameaux en fouets	Non	Oui	Oui	Oui	
Feuilles en paquets	Non	Non	Oui	Oui	
Visibilité du squelette	Non	Non	Partielle	Totale	

Sur chaque arbre, le diamètre à 1,5 mètres de hauteur a également été mesuré.

A l'analyse des données, un premier constat consiste à ne garder du jeu de données que les tiges ayant un D150 supérieur à 50 cm. N'oublions pas que dans le phénomène de dépérissement, le facteur âge joue pleinement son rôle (en particulier pour le hêtre). Une corrélation a ensuite été recherchée entre l'état sanitaire des arbres et les US. Après plusieurs manipulations (sans classe 0, sans classe 0 & 1, etc), il ne nous a pas été possible de dégager un lien. En effet, le jeu de données donne un bon aperçu de la situation sur l'ensemble de la zone, mais reste trop faible pour permettre des comparaisons avec des facteurs stationnels.

En effet, l'échantillon n'ayant pas été conçu dans ce but, la majorité des placettes se situe sur les 2 principales US.

De plus, un des facteurs que les gestionnaires forestiers et les scientifiques (Prof. Langohr, communication personnelle) considèrent comme prédominant dans ce phénomène de dépérissement en forêt de Soignes n'est pas cartographié à ce jour : la compaction d'origine anthropique des limons de surface due aux exploitations forestières, aux promeneurs et cavaliers. Cette dernière est admise comme préférentiellement développée sur une topographie de plateau. En effet, cette topographie permet une exploitation forestière plus aisée (passage d'engins tous les 8 ans).

La figure 93 illustre la valeur moyenne des états sanitaires mesurés sur les 138 placettes, avec en surimposition, les zones ouvertes aux cavaliers lors des années 1970. Agents de terrain et scientifiques argumentent pour une corrélation entre ces zones et un dépérissement plus prononcé. Le jeu de données présent ne peut cependant le mettre en évidence. Mais le problème est sans doute plus complexe et multifactoriel, faisant intervenir l'âge et d'autres facteurs de compaction.

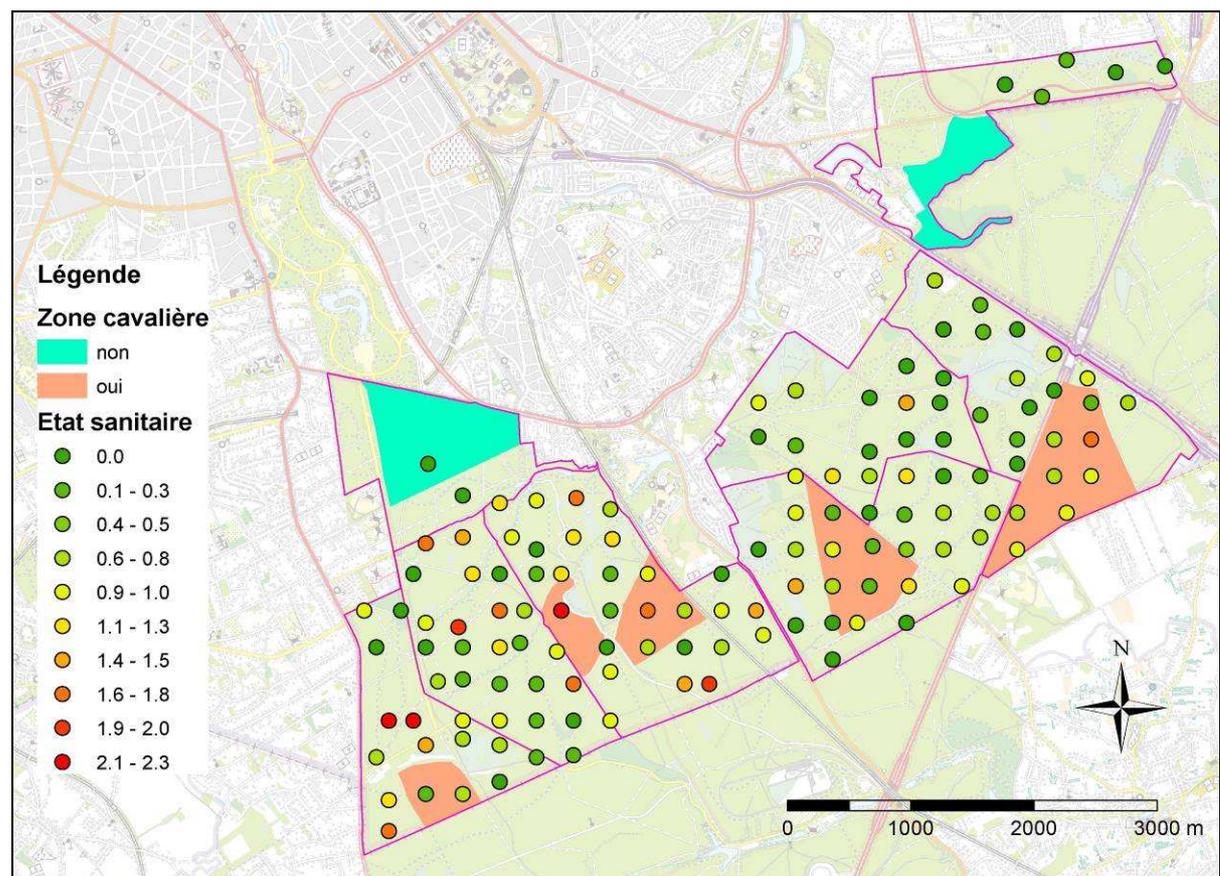


Figure 129- Détail des 138 placettes reprenant l'état sanitaire de 404 tiges de hêtre. Ce sont donc des valeurs moyennes. En saumon, les zones qui ont été dans les années 1970 ouvertes entièrement à la circulation équestre.

11.2. Est-ce envisageable d'aller vers une cartographie de la compaction superficielle des sols ?

La compaction du sol est une variable écologique importante pour le hêtre dont l'enracinement est sensible au manque de porosité. Plusieurs pistes sont à suivre quant une éventuelle cartographie de ce phénomène. Deux d'entre elles sont brièvement abordées dans ces paragraphes :

- Une cartographie existante s'attendant à décrire les phénomènes anthropiques sur la zone d'étude.
- L'étude de la végétation afin de dégager le cortège des espèces indicatrices de compacité.

11.2.1. Cartographie des phénomènes anthropiques

Le Prof. Langohr est à l'initiative (début des années 1980) d'une cartographie des phénomènes anthropiques en forêt de Soignes. Avec son équipe, il a cartographié 40 % de la forêt de Soignes sur les 3 Régions confondues. Les deux figures suivantes illustrent les mesures effectuées sur le terrain à l'échelle 1/2500^{ème} (reporté sur carte à 1/5000^{ème}).

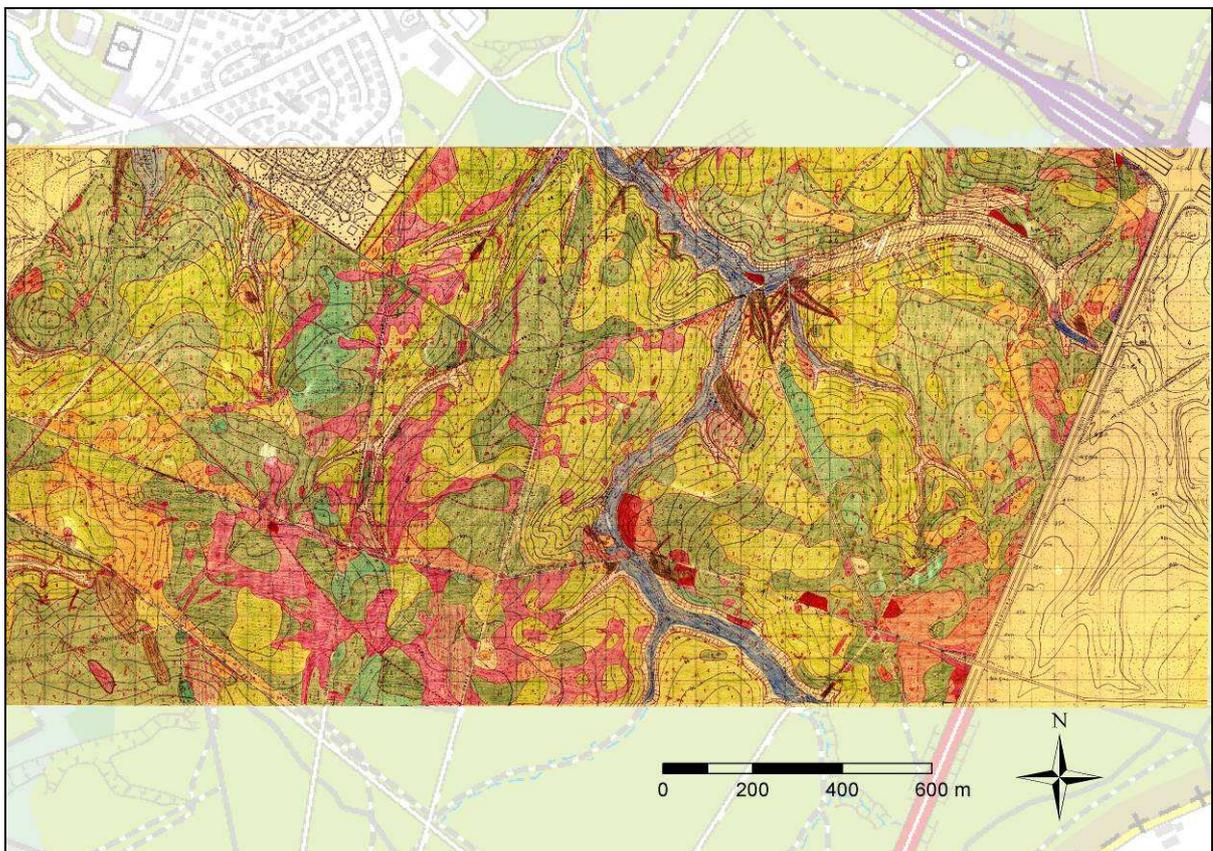


Figure 130 - Vue d'ensemble d'une carte (scannée et géoréférencée) réalisée par le Prof. Langohr et visant à caractériser les phénomènes anthropiques sur le massif sonien.

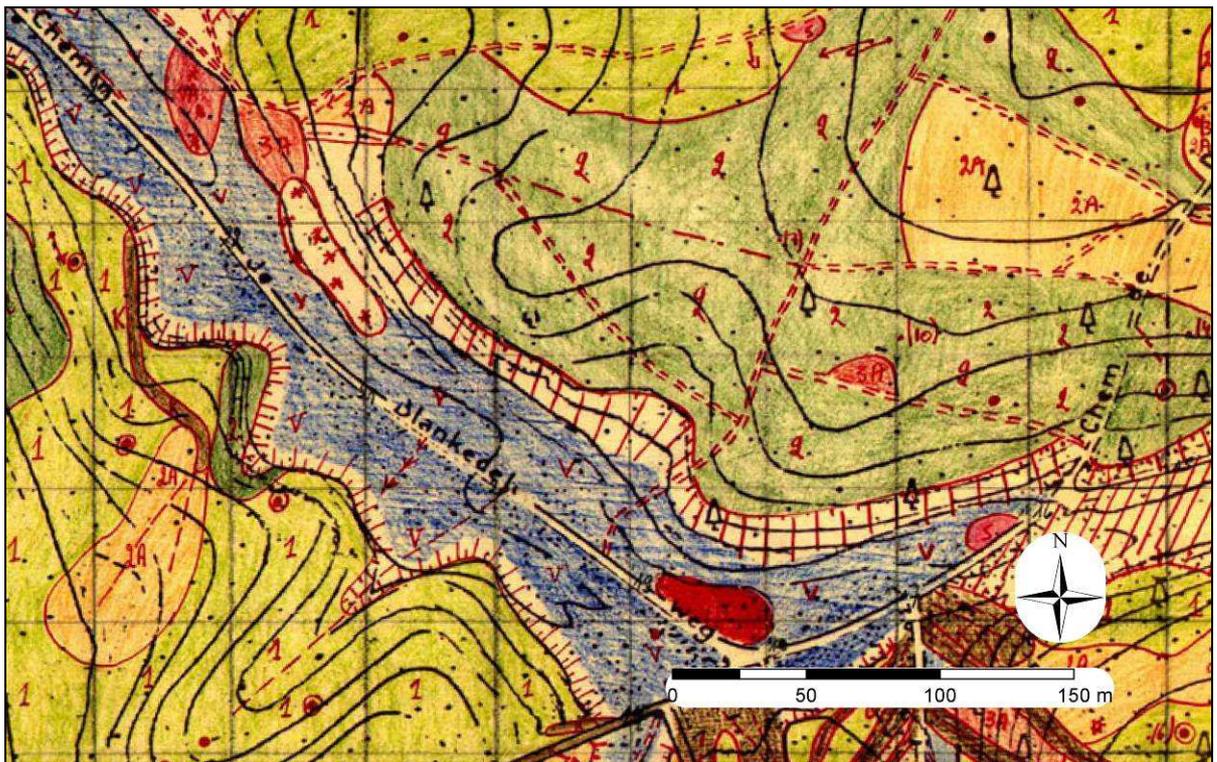


Figure 132 - Vue rapprochée d'une carte (scannée et géoréférencée) réalisée par le Prof. Langohr et visant à caractériser les phénomènes anthropiques sur le massif sonien.



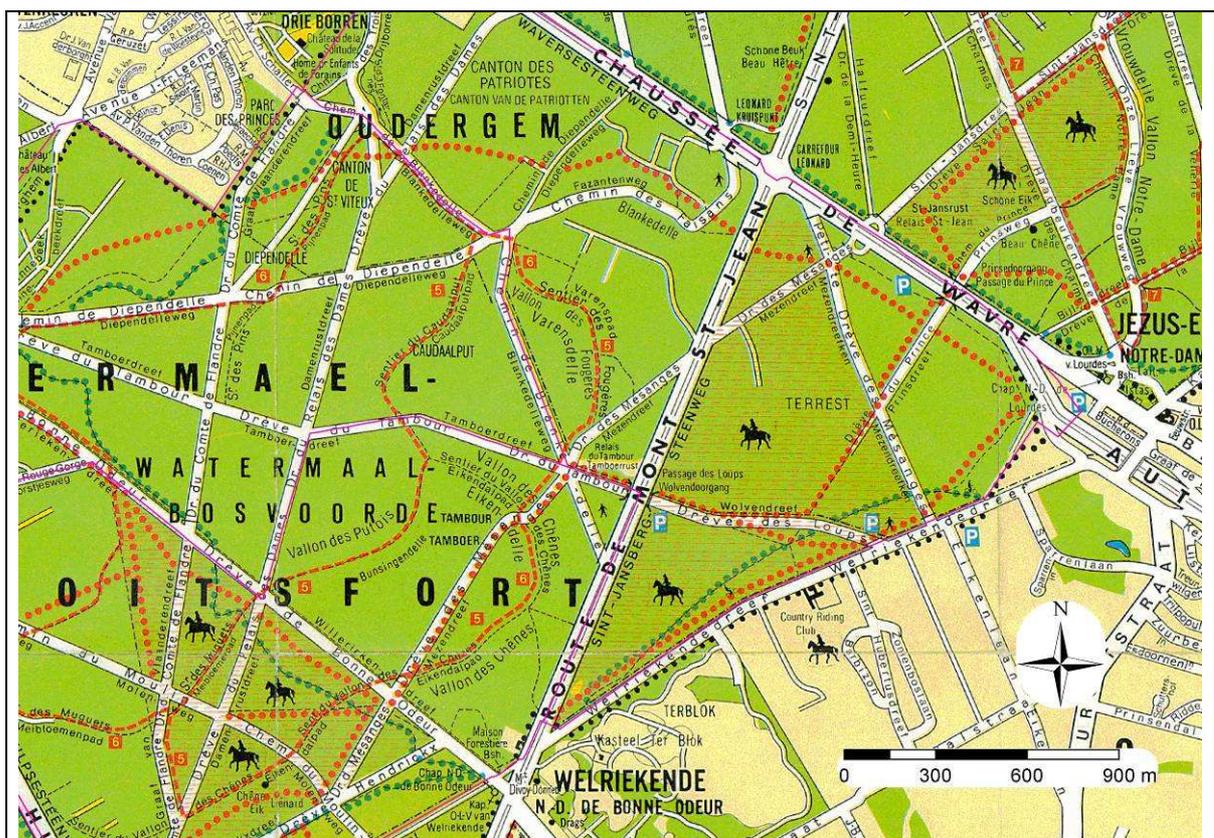
Figure 133 - Vision rapprochée de la carte visant à caractériser les phénomènes anthropiques sur le massif sonien. Illustration d'une zone avec de grandes surfaces fortement perturbées (en rouge).

Plusieurs de ces rubriques présentent ou pourraient présenter un intérêt pour le sylviculteur. En particulier, la rubrique décrivant les zones superficiellement très perturbées (en rouge) est d'un grand intérêt. Une étude approfondie de ces zones, dans la composition floristique ainsi que leur éventuel « expansion » depuis les années 1980 serait révélateur. Comme nous pouvons le voir à la figure suivante, ces aires perturbées peuvent être conséquentes selon les zones.

Le microrelief présente également un intérêt, notamment sur plateau, mettant en évidence des zones de micro cuvettes. De plus, l'origine anthropique ou non de ce micro relief apporte également une information pertinente.

Enfin, et sans reprendre une à une toute les rubriques, une autre information précise et qui pourrait apporter beaucoup pour le forestier : les chablis. En effet, le Prof. Langohr et son équipe ont cartographié toutes les souches de chablis encore présentes sur la zone à l'époque. Et information essentielle, les directions de chute sont également renseignées. Nous reviendrons sur ce point à la section suivante.

Un parallèle entre cette carte et la carte des zones ouvertes à la circulation cavalière durant les années 1970 (Figure 134) révélerait l'influence de cette circulation sur les sols soniens.



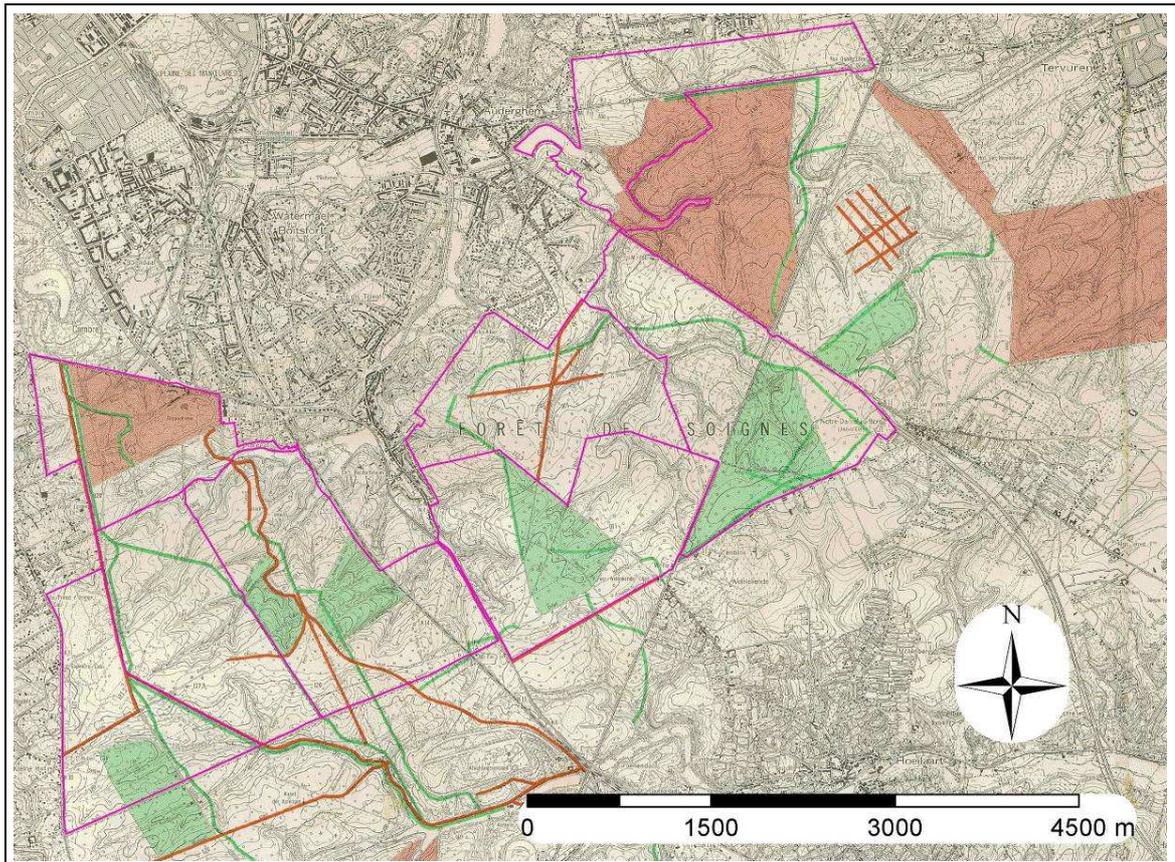


Figure 134 - Illustration des cartes reprenant les différentes zones ouvertes à la circulation cavalière dans les années '70 (en vert), ainsi que les zones strictement interdites à la circulation (en rouge).

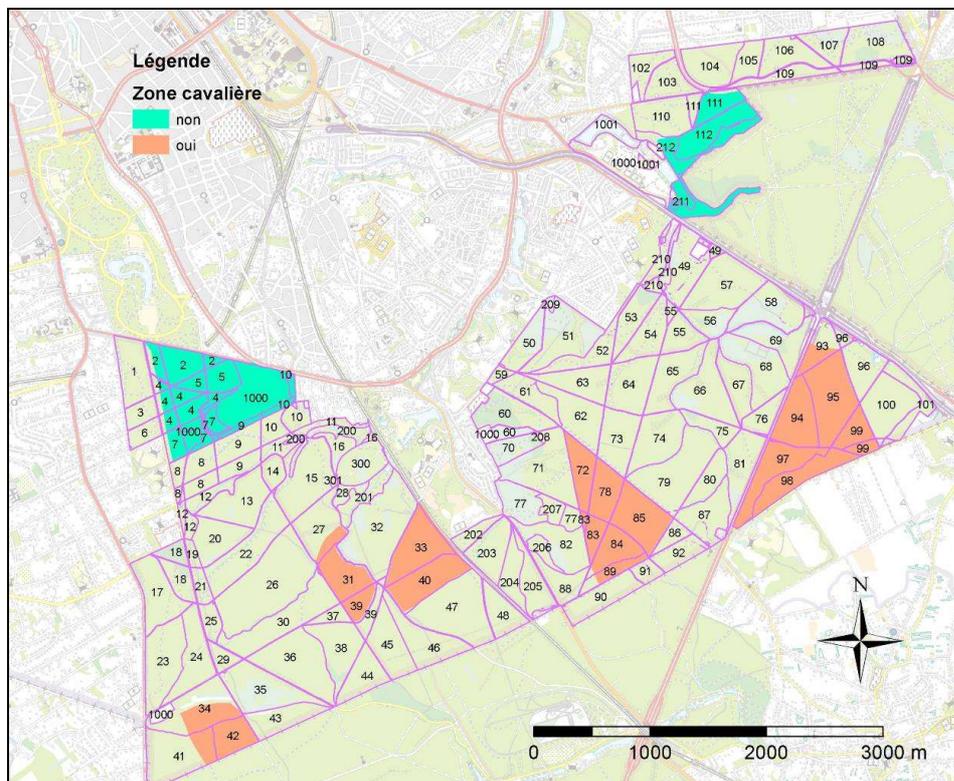


Figure 135 - Zones ouvertes à la circulation équestre dans les années 1970 (en rouge) et zones strictement interdites à cette circulation (en vert).

En conclusion, cette carte des influences anthropiques présente de nombreux intérêts (patrimonial, micro topographie, zones perturbées, chablis) et son intégration dans un SIG pourrait apporter une réflexion supplémentaire en matière de gestion. De plus, pour les zones perturbées, elle nous renseigne une situation instantanée du début des années 1980, il serait intéressant de prospecter l'évolution de l'étendue de ces zones.

Seules quelques cartes ont été « colorisées » en version papier, mais l'information des relevés (40 % de la forêt de Soignes) reste disponible à l'Université de Gand.

11.2.2. Cortège floristique indicateur de compaction

Godefroid et Koedam (Godefroid & Koedam, 2004) ont étudié les indicateurs floristiques de la compaction superficielle en forêt de Soignes. La Figure 136 présente la synthèse de ce cortège indicateur de sols compactés (plantes les plus courantes et significatives).

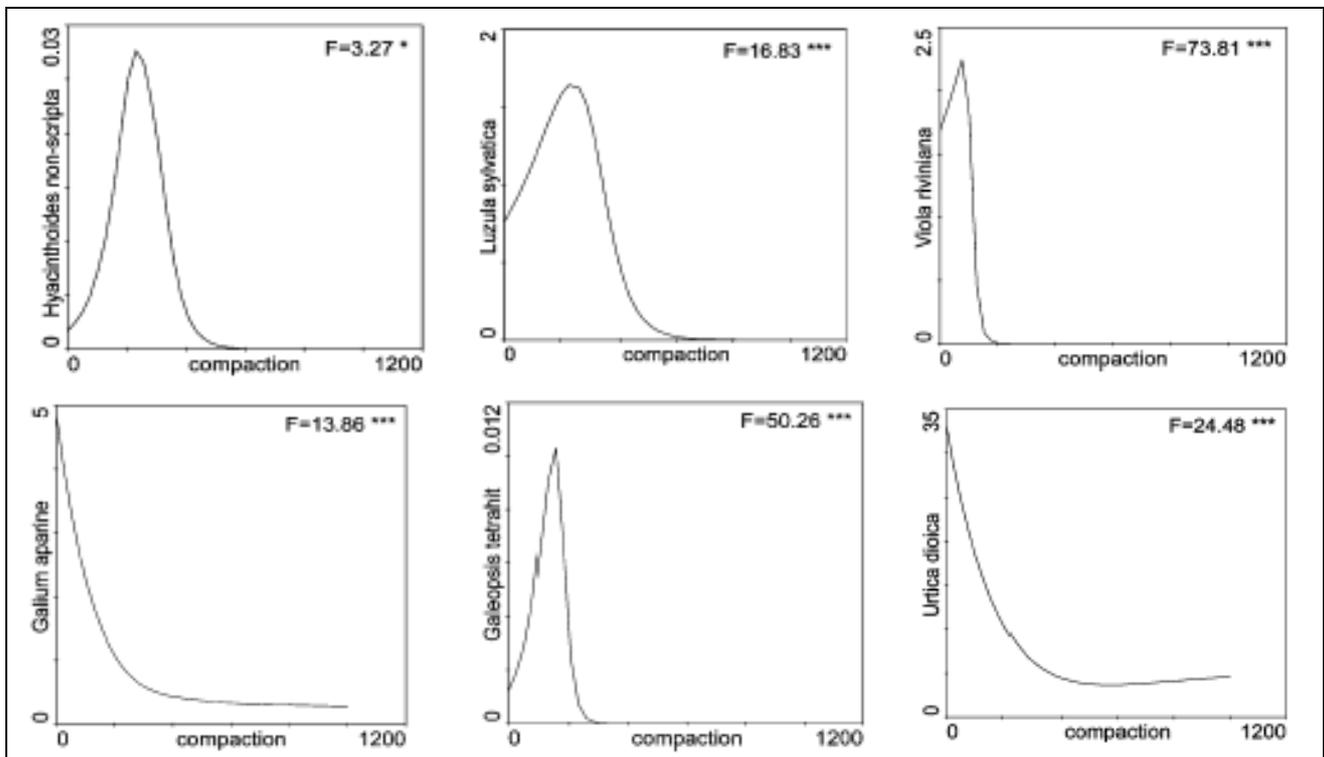


Figure 136 - Listes des espèces considérées comme indicatrices d'un sol non compacté superficiellement. La réponse (ordonnée : pourcentage estimé des valeurs de recouvrement) des espèces significativement corrélées à la compaction du sol (en abscisse ; unité : Newton) (source : Godefroid et Koedam 2004).

Les espèces indicatrices de sols non perturbés reprennent la *jacinthe des bois*, indicateur également des sols profonds. La *grande luzule*, l'*ortie* et le *gaillet gratteron* répondent également de manière significative, pouvant cependant être présentes de manière sporadique sur sols compactés. La *violette de Rivin* est une espèce acidiphile de mull-moder. Le *Galéopsis tétrahit*, appelé également *ortie royale*, réclame quant à lui des sols plus frais. On le retrouvera préférentiellement dans les fonds de vallon, sur des sols « jeunes » à développement de profil non différencié.

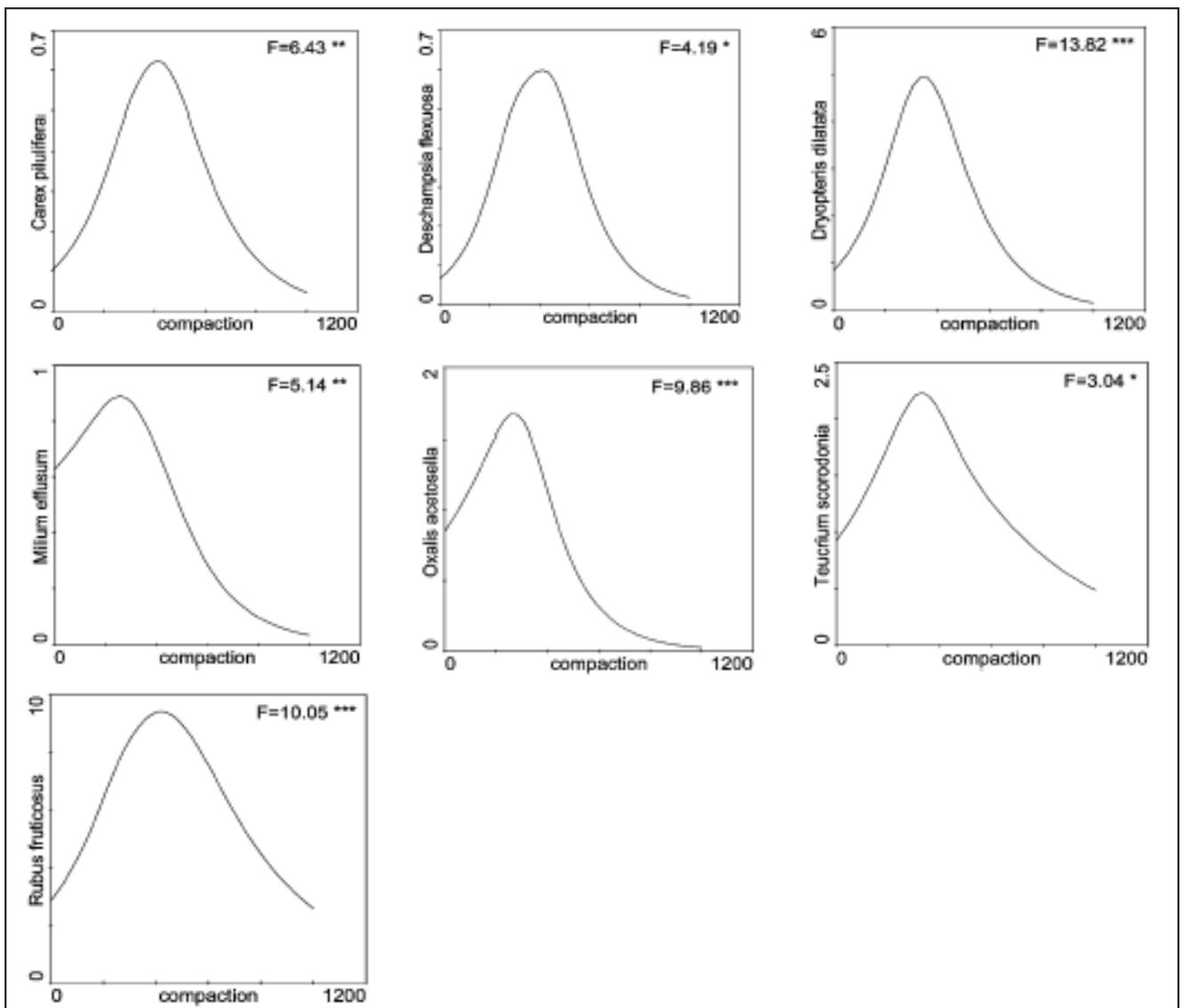


Figure 137 - Listes des espèces considérées comme indicatrices d'un sol légèrement compacté superficiellement. La réponse (ordonnée : pourcentage estimé des valeurs de recouvrement) des espèces significativement corrélées à la compaction du sol (en abscisse ; unité : Newton) (source : Godefroid et Koedam 2004).

Concernant le cortège d'espèces témoignant d'un sol légèrement perturbé, nous retrouvons des acidiphiles courantes en situation de plateau : la *laîche à pilules*, la *canche flexueuse*, le *polystic dilaté*, l'*oxalide petite oseille*, la *germandrée scorodaine*. La *ronce des bois*, reprenant l'ensemble des espèces reprises sous l'appellation commune *Rubus fruticosus*, est une espèce héliophile et mésophile. Cette dernière profite généralement d'une ouverture du couvert pour se développer de manière envahissante. Enfin, le millet étalé est une graminée des sols frais à assez frais, acidicline.

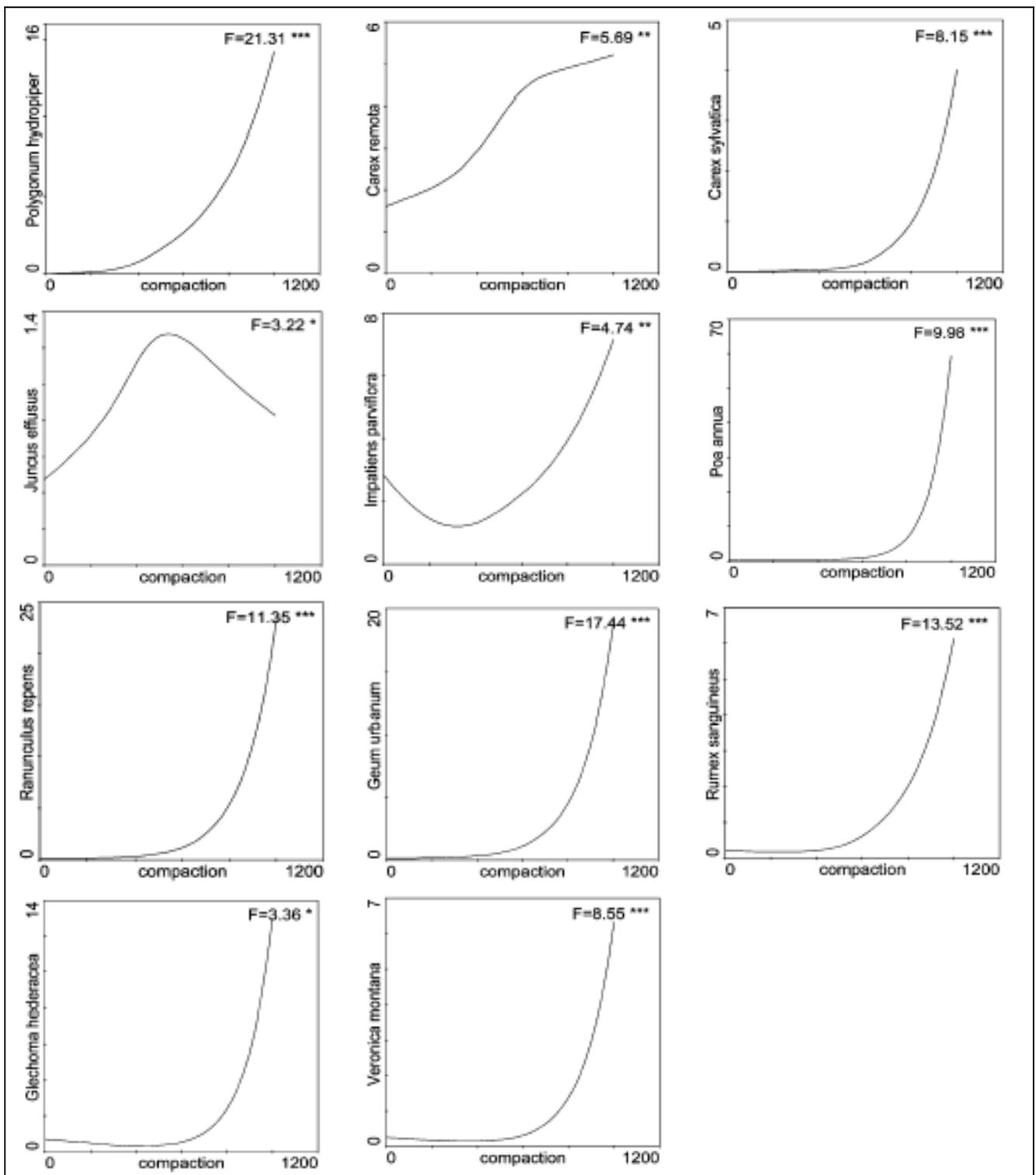


Figure 138 - Listes des espèces considérées comme indicatrices d'un sol fortement compacté superficiellement. La réponse (ordonnée : pourcentage estimé des valeurs de recouvrement) des espèces significativement corrélées à la compaction du sol (en abscisse ; unité : Newton) (source : Godefroid et Koedam 2004).

Les herbacées indicatrices d'un sol perturbé peuvent être ventilées comme suit :

- Le *poivre d'eau* (*Polygonum hydropiper*) est probablement l'espèce la plus typique. Elle est courante des chemins forestiers humides.

- Les carex et joncs : la *laïche espacée* (*Carex remota*), la *laïche des bois* (*Carex sylvatica*) et le *jonc épars* (*Juncus effusus*). Le caractère indicateur de milieux perturbés de ces espèces est déjà bien connu des phytosociologues.
- L'espèce invasive *Impatiens parviflora* (*Balsamine à petites fleurs*, originaire de Sibérie et du Turkestan) est en expansion sur ces milieux. Cette neutronitrocline se retrouve sur sols frais, souvent en concurrence avec la *circée de Paris* (*Circaea lutetiana*, acidicline hygrocline).
- Les autres espèces :
 - *Poa annua* (le *pâturin annuel*), graminée sur sol dénudé, sites rudéralisés.
 - *Ranunculus repens* (la *renoncule rampante*), sur sols frais à humides.
 - *Geum urbanum* (la *benoîte commune*), neutronitrocline courante des chemins forestiers.
 - *Rumex sanguineus* (l'*oseille sanguine*), mésohygrophile se retrouvant dans les bois frais et humides, mais également aux bords des chemins.
 - *Glechoma hederacea* (le *lierre terrestre*), neutronitrophile hygrocline fréquente du bord des chemins.
 - *Veronica montana* (la *véronique des montagnes*), acidicline hygrocline, milieux forestiers et bords des chemins.

Le cortège d'espèces herbacées indicatrices évoquées précédemment ne représente cependant pas un outil diagnostique infaillible, ne fût-ce que par la fréquente absence de ces indicateurs dans les hêtraies denses sans strate herbacée (« *Fagetum nudum* »). Néanmoins, il serait intéressant de disposer de cet outil pour affiner le diagnostic stationnel par rapport aux types de station et étudier l'impact de la compaction sur la santé des peuplements (dépérissement, absence de régénération,...).

Une confrontation de ces indicateurs floristiques avec la cartographie réalisée par l'équipe du Prof. Langohr aurait aussi son intérêt pour utiliser plus directement cette carte.

11.3. Qu'en est-il du risque de chablis sur la zone d'étude ?

Concernant le hêtre, ce phénomène reste intimement lié au dépérissement dans le sens où il est le plus souvent provoqué suite à un ancrage racinaire déficitaire.

Rappelons la notion suivante concernant l'enracinement du hêtre sur sols à *Fragipan* : l'ensemble des racines de l'arbre ne peuvent pas traverser ces « boîtes fermées » mais certaines racines obliques passent entre ces « boîtes fermées » pour atteindre le loess vers 2 à 3 m de profondeur, ce qui explique par ailleurs la haute fertilité des peuplements de hêtre de la forêt de Soignes. Quand l'arbre devient relativement âgé (+- 80 ans), ces racines de par leur croissance finissent par occuper tout l'espace « offert » dans les gloses. Ne supportant pas l'hypoxie, elles finissent par mourir. Cette perte racinaire perturbe fortement l'alimentation hydrique et trophique de l'arbre. De plus, ces racines finissent par pourrir et la stabilité de l'individu finit par reposer sur un système racinaire superficiel, traçant par la force des choses et cantonné au 40-50 premiers centimètres du sol (parfois moins). Nombre de chablis sont encore en forêt pour témoigner de ce phénomène.

Une démarche intéressante serait de comparer les différentes « zones à chablis » avec les conditions stationnelles exprimées par l'intermédiaire des US. Ces zones pourraient également être comparées avec les zones de compaction de surface. En effet, les gestionnaires considèrent que les chablis, au même titre que le dépérissement, sont fréquents sur ces zones. Nous ne nous sommes pas attelés à cette tâche dans la présente étude, mais soulignons 2 sources d'information concernant ces chablis :

Premièrement, la carte du Prof. Langohr renseigne sur la zone prospectée tous les chablis dont la souche est visible et restée sur place (instantanée début des années 1980). L'orientation de ces chablis est également renseignée, pouvant mettre en évidence l'existence de couloirs où le vent s'engouffrerait préférentiellement. C'est une interprétation à réaliser avec nuance. Rappelons que depuis les années 1980, le faciès des peuplements a malgré tout changé.

Deuxièmement, un recensement de ces chablis (par année) est tenu à jour par les deux brigades. Un exemple est illustré à la figure suivante. Malheureusement, seul le nombre de chablis par parcelle est notifié. L'orientation n'est pas consignée, ni la localisation exacte, ce qui dans le cas de forte tempête reste fastidieux à tenir. L'information par parcelle peut néanmoins être comparée avec les zones fortement perturbées ou les zones d'ouverture à la circulation équestre dans les années 1970. Une analyse approfondie pourrait tenter d'expliquer ces chablis par divers facteurs comme l'âge des peuplements, l'US concernée, la compaction du sol, etc.

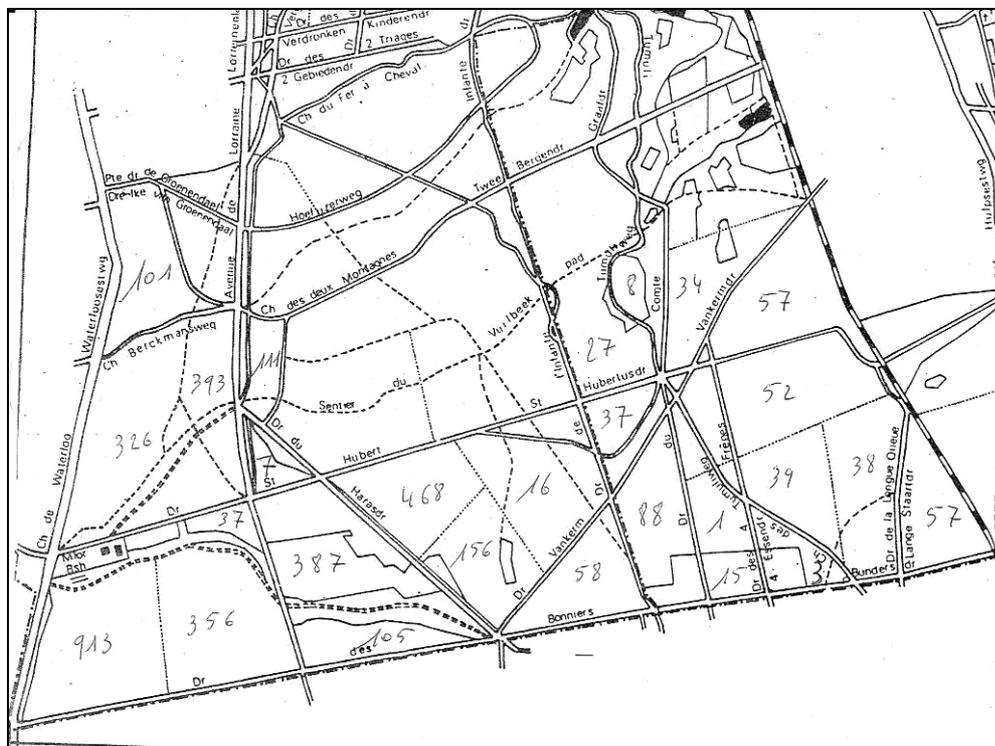


Figure 139 - Exemple de la comptabilisation des chablis sur le parcellaire forestier. Information concernant ici la période allant de l'hiver 1987/88 jusqu'à la fin de l'année 2000.

Conclusion & perspectives

Les objectifs premiers de cette étude étaient d'analyser en détail l'adéquation essence – station actuelle et surtout future dans le contexte des changements climatiques, et de proposer, le cas échéant, des alternatives aux essences actuelles, et en particulier au hêtre qui semble déjà le plus fragilisé dans les conditions actuelles.

Dans un premier temps, nous avons donc analysé la littérature pour identifier l'impact des changements climatiques sur le climat local de la forêt de Soignes. L'échéance de la fin du XXI^e siècle a été choisie car elle peut correspondre à une révolution de hêtre (1 siècle), tout en restant encore dans des limites acceptables quant à la validité des résultats des modèles climatiques. Le scénario d'évolution du climat sélectionné est celui le plus souvent vulgarisé par le GIEC, mais pas forcément le plus probable ni le plus alarmiste. Selon ces hypothèses, le climat de la forêt de Soignes à la fin du XXI^e siècle se situe dans des valeurs comparables à celui qui prévaut actuellement dans la basse Loire (Perin *et al.*, 2009), c'est-à-dire une région à très faible potentialité de hêtre (Badeau et al, 2003).

Via l'élaboration d'un catalogue de stations, une analyse plus locale, prenant en compte les paramètres topographiques, géologiques et pédologiques, a ensuite été menée pour évaluer les sensibilités des différentes stations aux changements climatiques et les mettre en relation avec les sensibilités des principales essences forestières de production.

Il a été confirmé par cette analyse que l'essence majeure de la forêt de Soignes, le hêtre, n'est actuellement pas dans une situation optimale en raison de la présence quasi continue de fragipan. La situation géomorphopédologique de la forêt de Soignes n'est donc pas de nature à compenser les effets climatiques défavorables qui s'annoncent pour la fin du XXI^e siècle. Il est donc clair qu'à l'avenir, le hêtre sera de plus en plus déstabilisé et que son éventuel maintien doit s'accompagner de mesures sylvicoles drastiques (diminution significative de la révolution, limitation des surfaces consacrées au hêtre en peuplement pur, etc.).

La même analyse essence-station a été menée pour une série d'essences de production. Elle a montré qu'il existe quelques alternatives parmi les autres essences, mais que les caractéristiques du sol (acidité, fragipan) représentent malgré tout un facteur limitant pour de nombreuses espèces. Le chêne sessile est la seule essence à haute valeur patrimoniale qui peut remplacer le hêtre pour former des « futaies cathédrales ». Mais d'autres essences plus originales pourraient contribuer à former une forêt variée plus apte à s'adapter aux changements climatiques : tilleul à petites feuilles, bouleau verruqueux, pins, etc. Les potentialités de ces différentes essences ont été illustrées par des couples de cartes [2000, 2100] qui ont surtout valeur de tendance. Il est en effet actuellement irréaliste d'établir très précisément l'adéquation essence – station à la fin du XXI^e siècle tant il reste des incertitudes à tous les niveaux. C'est aussi pour cette raison que l'analyse d'essences exotiques a été assez limitée malgré les possibilités qu'offre la diversité des forêts tempérées du monde (Amérique de l'ouest, de l'est, Himalaya, Chine,...).

Cependant, le choix d'essences adaptées n'est qu'une facette du problème. Il est aussi important de privilégier la diversité génétique, préalable à toute adaptation aux changements globaux, ainsi que le mélange d'essences, surtout s'il apparaît que l'espèce principale en

place devrait régresser sous l'effet du réchauffement climatique, ce qui est largement le cas en forêt de Soignes.

Par ailleurs, il ne faut pas perdre de vue que les essences plantées aujourd'hui doivent d'abord résister aux facteurs climatiques et stationnels actuels avant d'être soumis à ceux qui seraient en vigueur à l'horizon 2100.

D'un point de vue méthodologique, cette étude s'est appuyée sur le développement d'un outil d'analyse : le catalogue des stations. En lui-même, il constitue aussi une référence pour les gestionnaires forestiers. En effet, les types de station qu'il présente constituent autant de contextes sylvicoles pour mener une gestion adaptative et différenciée de la forêt de Soignes.

Enfin, cette étude ouvre aussi des perspectives à différents niveaux :

- la hêtraie est à considérer sous un œil nouveau et des voies de sylviculture adaptées aux risques mis en évidence doivent être mises en œuvre. En effet, dans le contexte rapidement changeant, les gestionnaires forestiers ne peuvent plus fonder leurs projets dans l'expérience du passé, comme ils pouvaient se le permettre jusqu'à présent. Le statut qui n'est plus de mise ;
- Le catalogue des stations constitue un nouvel outil que les gestionnaires de terrain peuvent s'approprier. Pour cela, au-delà des choix d'essences qu'il permet, il faudrait aussi développer des recommandations de gestion différenciées selon les types de station ;
- D'un point de vue scientifique aussi, la catalogue pourrait servir de référentiel écologique pour de nombreuses études, comme le monitoring via l'inventaire forestier, l'étude du dépérissement, des chablis ou tout autre phénomène. Différentes voies ont déjà été explorées en chapitre 6.

Bibliographie

- André, P. & Laudelout, H. (1992). Le dépérissement du Chêne: Etat de la question et bibliographie. *Forêt wallonne*, 14, 16-20.
- Asshoff, R., Zotz, G., & Korner, C. (2006). Growth and phenology of mature temperate forest trees in elevated CO₂. *Global Change Biology*, 12 (5), 848-861.
- Aussenac, G. & Guehl, J.-M. (1994). Les dépérissements d'arbres forestiers, causes connues et inconnues. Dépérissement et accidents climatiques. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 458-470.
- Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J., & Le Bas, C. (2004). *Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. Résumé du rapport final juin 2004*. Rep. No. 4154 B. INRA, Nancy.
- Baize, D. & Jabiol, B. (1995). *Guide pour la description des sols.*, pp 375 p. INRA, Paris.
- Bardat, J., Bioret, F., Botineau, M., Rameau, J.C., Royer, J.-M., Roux, G., & Touffet, J. (2004). *Prodome des végétations de France*, France.
- Barnett, D., Brown, S., Murphy, J., Sexton, D., & Webb, M. (2006). Quantifying uncertainty in changes in extreme event frequency in response to doubled CO₂ using a large ensemble of GCM simulations. *Climate Dynamics*, 26 (5), 489-511.
- Bartoli, M., Tran-Ha, M., Largier, G., Dume, G., & Larrieu, L. (2000). Ecoflore, un logiciel simple de diagnostic écologique. *Revue Forestière Française*, 6, 530-547.
- Bary-Lenger, A., Boinon, M., & Guns, A. (1995). Comment prédire la productivité de l'épicéa commun (*Picea abies* KARST.) dans les forêts ardennaises. *Silva Belgica*, 102 (6), 9-16.
- Becker, M., Nieminen, T.M., & Gérémy, F. (1994). Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric 2. *Ann. For. Sci.*, 51, 477-492.
- Beniston, M., Stephenson, D., Christensen, O., Ferro, C., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., & Woth, K. (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81 (0), 71-95.
- Blin, C., Higué, I., Petit, P., & Brahy, V. (2007). *La pollution photochimique*. In *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007*, pp. 736. MRW - DGNRE, Namur.
- Bonneau, M. (1994). Les dépérissements à causes multiples: caractéristiques générales. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 472-473.
- Brasier, C.M. (1996). Phytophthora cinnamomi and oak decline in southern Europe. Environmental constraints including climate change. *Ann. For. Sci.*, 53, 347-358.

- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E., & Granier, A. (1993a). Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. *Ann. For. Sci.*, 50, 571-582.
- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E., & Granier, A. (1993b). Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 23 (6), 1136-1143.
- Bréda, N., Granier, A., Barataud, F., & Moyne, C. (1995). Soil water dynamics in an oak stand. *Plant and Soil*, 172, 17-27.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.*, 63, 625-644.
- Broadmeadow, M.S.J., Heath, J., & Randle, T.J. (1999). Environmental Limitations to O₃ Uptake - Some Key Results from Young Trees Growing at Elevated CO₂ Concentrations. *Water, Air, & Soil Pollution*, 116 (1), 299-310.
- Broadmeadow, M.S.J. & Jackson, S.B. (2000). Growth responses of *Quercus petraea*, *Fraxinus excelsior* and *Pinus sylvestris* to elevated carbon dioxide, ozone and water supply. *New Phytologist*, 146 (3), 437-451.
- Bruhn, D., Leverenz, J.W., & Saxe, H. (2000). Effects of tree size and temperature on relative growth rate and its components of *Fagus sylvatica* seedlings exposed to two partial pressures of atmospheric [CO₂]. *New Phytologist*, 146 (3), 415-425.
- Bruno, E. & Bartoli, M. (2001). Premiers enseignements de l'utilisation du logiciel Ecoflore pour traiter les relevés botaniques de l'IFN. *Revue Forestière Française*, 53 (3-4), 391-396.
- Chaar, H. & Colin, F. (1999). Impact of late frost on height growth in young sessile oak regenerations. *Ann. For. Sci.*, 56, 417-429.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.-F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., vesala, T., & Valentini, R. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437 (22), 529-533.
- Clark, R., Brown, S., & Murphy, J. (2006). Modelling Northern Hemisphere summer heat extreme changes and their uncertainties using a physics ensemble of climate sensitivity experiments. *J. Clim.*, 19, 4418-4435.
- Cochard, H., Bréda, N., & Granier, A. (1996). Whole tree hydraulic conductance and water loss regulation in *Quercus* during drought: evidence for stomatal control of embolism ? *Ann. For. Sci.*, 53, 197-206.

- Cochard, H., Bréda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (1992). Vulnerability to air embolism of three european oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q pubescens* Willd, *Q robur* L). *Ann. For. Sci.*, 49, 225-233.
- Cornelissen, J.H.C., Carnelli, A.L., & Callaghan, T.V. (1999). Generalities in the growth, allocation and leaf quality responses to elevated CO₂ in eight woody species. *New Phytologist*, 141 (3), 401-409.
- Cruziat, P., Cochard, H., & Améglio, T. (2002). Hydraulic architecture of trees: main concepts and results. *Annals of Forest Science*, 59, 723-752.
- De Langhe, J.-E., Delvosalle, L., Duvigneaud, J., Lambinon, J., & Vanden Berghen, C. (2004). *Nouvelle flore de la Belgique, du G.-D. de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines*. Edition du Patrimoine du Jardin botanique national de Belgique, Meise.
- Delbart, N., Picard, G., Le Toan, T., Kergoat, L., Queguan, S., Woodward, I., Dye, D., & Fedotova, V. (2008). Spring phenology in boreal Eurasia over a nearly century time scale. *Global Change Biology*, 14 (3), 603-614.
- Delvaux, J. & Galoux, A. (1962). Les territoires écologiques du Sud-Est belge. *Travaux hors-série*, Bruxelles, ULB, Centre d'écologie générale. 311.
- Desprez-Loustau, M.-L., Marçais, B., Nageleisen, L.-M., Piou, D., & Vannini, A. (2006). Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Ann. For. Sci.*, 63, 597-612.
- Drénou, C., Bonneau, M., Charnet, F., Cruziat, P., Frochot, H., Garbaye, J., Girard, S., Larrieu, L., Lévy, G., Marçais, B., Moore, W., & Rossignol, J.-P. (2006). *Les racines - Face cachée des arbres*. Institut pour le Développement Forestier. pp 335, Paris.
- Dreyer, E., Colin-Belgrand, M., Sculler, I., Biron, P., Bousquet, F., & Aussenac, G. (1990). Diversité des caractéristiques écophysiological des chênes européens: quelques exemples. *Revue Forestière Française*, 42 (2), 174-181.
- Dubois-Coli, C. & Wolff, M. (2008). *La prise en compte des changements climatiques dans les forêts d'Alsace : les problèmes sanitaires des forêts alsaciennes*. Office National des Forêts - Direction Territoriale Alsace.
- Dulière, J.F. & Malaisse, F. (1995). Le point sur le dépérissement du Chêne: état des connaissances présenté au colloque international de Nancy (septembre 1994). *Forêt wallonne*, 22, 17-19.
- Dupouey, J.L., Thimonier, A., Lebourgeois, F., Becker, M., Picard, J.F., & Timbal, J. (1999). Changements de la végétation dans les forêts du Nord-Est de la France entre 1970 et 1990. *Revue Forestière Française*, LI (2), 219-228.
- El Bayad, J. (1996). *Dégradation hydromorphe des sols limoneux acides sous monoculture de hêtre en forêt de Soignes. Contribution à l'étude des conséquences édaphiques du compactage des sols par l'exploitation forestière mécanisée*. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.

- Epron, D. & Dreyer, E. (1993). Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.] in a natural stand. *New Phytologist*, 125 (2), 381-389.
- Etienne, M. (2001) La fertilité des sols en milieu forestier : La question du dépérissement du chêne, pp. 80 p. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- European_Environment_Agency (2004). *Impacts of Europe changing climate : an indicator-based assessment*. EEA report n°2/2004.
- Farage, P.K. (1996). The effect of ozone fumigation over one season on photosynthetic processes of *Quercus robur* seedlings. *New Phytologist*, 134 (2), 279-285.
- Fitter, R., Fitter, A., & Blamey, M. (1997). *Guide des fleurs sauvages* Vol. 6e éd. Delachaux et Niestlé, Lausanne.
- Fitter, R., Fitter, A., & Farrer, A. (1991). *Guide des graminées, carex, joncs et fougères*. Delachaux et Niestlé, Paris.
- Focant, A. & Malaisse, F. (2001). Dépérissement du Chêne en Wallonie: état de la question. *Forêt wallonne*, 49-50, 17-35.
- Foret, M. & Dume, G. (2006). *Les outils d'aide à la reconnaissance des stations forestières et au choix des essences - Méthodes et recommandations pratiques ou Guide-âne*, pp 224. IFN.
- Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., & Vidale, P.L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research*, 111, 22.
- Gao, X., Pal, J.S., & Giorgi, F. (2006). Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 33.
- Gerosa, G., Marzuoli, R., Desotgiu, R., Bussotti, F., & Ballarin-Denti, A. (2008). Visible leaf injury in young trees of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in relation to ozone uptake and ozone exposure. An Open-Top Chambers experiment in South Alpine environmental conditions. *Environmental Pollution*, 152 (2), 274-284.
- Gillet, A., Morelle, K., & Claessens, H. (2007). Peut-on se prémunir contre le dépérissement du chêne ? *Forêt wallonne*, 88, 3-12.
- Giot, P. & Malaisse, F. (1997). La forêt sous haute surveillance: un bilan du dépérissement des forêts. *Forêt wallonne*, 30, 3-21.
- Godefroid, S. & Koedam, N. (2004). Interspecific variation in soil compaction sensitivity among forest floor species. *Biological conservation*, 119, 207-217.

- Guehl, J.-M., Picon, C., Vivin, P., Cochard, H., & Aussenac, G. (1999). Forêts et augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂: effets bénéfiques ou adverses? *Revue Forestière Française*, LI (2-1999), 254-265.
- Herbauts, J., El Bayad, J., & Gruber, W. (1998). L'impact de l'exploitation forestière mécanisée sur la dégradation physique des sols : le cas des sols limoneux acides de la forêt de Soignes (Belgique). *Revue Forestière Française*, 50 (2), 124-137.
- Huart, O., De Proft, M., Grégoire, J.-C., Piel, F., Gaubicher, B., Carlier, F.-X., Maraïte, H., & Rondeux, J. (2003). Le point sur la maladie du Hêtre en Wallonie. *Forêt wallonne*, 64, 2-20.
- IBGE (2007). *La qualité de l'air en Région de Bruxelles Capitale - Période estivale 2007*. Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, Bruxelles.
- Klap, J.M., Oude Voshaar, J.H., De Vries, W., & Erisman, J.W. (2000). Effects of Environmental Stress on Forest Crown Condition in Europe. Part IV: Statistical Analysis of Relationships. *Water, Air, & Soil Pollution*, 119 (1), 387-420.
- Knippertz, P., Ulbrich, U., & Speth, P. (2000). Changing cyclones and surface wind speeds over the North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. *Climate Research*, 15, 109-122.
- Korner, C. (2003). Carbon limitation in trees. *Journal of Ecology*, 91 (1), 4-17.
- Kramer, K. (1994). A modelling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. *Plant, Cell & Environment*, 17, 367-377.
- Kramer, K. (1995). Phenotypic plasticity of the phenology of seven European tree species in relation to climatic warming. *Plant, Cell & Environment*, 18, 93-104.
- Langohr, R. & Cuyckens, G. (1986). Une forêt au pied de limon - Sol et relief en Forêt de Soignes : des témoins uniques ! *Réserves naturelles*, 3, 51-58.
- Langohr, R. & Mikkelsen, J. (2001) Understanding soilscape evolution of the Belgian loess belt - a review of 25 years research In International Working Meeting on Micropedology. Ghent University, Ghent.
- Larcher, W. (1975). *Physiological plant ecology*.
- Laurent, C. & Lecomte, H. (2007). *La santé des forêts*. In *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007*, pp. 200-209. MRW - DGNRE, Namur.
- Lebourgeois, F., Granier, A., & Bréda, N. (2001). Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. *Ann. For. Sci.*, 58, 733-754.

- Lebourgeois, F. & Jabiol, B. (2002). Enracinement comparés du Chêne sessile, du Chêne pédonculé et du Hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française*, LIV (1-2002), 17-42.
- Leckebusch, G.C. & Ulbrich, U. (2004). On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Global and Planetary Change Extreme climatic events*, 44 (1-4), 181-193.
- Leuschner, C., Hertel, D., Schmid, I., Koch, O., Muhs, A., & Hölscher, D. (2004). Stand fine root biomass and fine root morphology in old-growth beech forests as a function of precipitation and soil fertility. *Plant and Soil*, 258, 43-56.
- Leverenz, J.W., Bruhn, D., & Saxe, H. (1999). Responses of two provenances of *Fagus sylvatica* seedlings to a combination of four temperature and two CO₂ treatments during their first growing season: gas exchange of leaves and roots. *New Phytologist*, 144 (3), 437-454.
- Lévy, G., Le Goff, N., Lefèvre, Y., & Garros, L. (1992). Les exigences stationnelles du frêne dans le Nord et le Nord-Est de la France. *Revue Forestière Française*, 44, 20-26.
- Lévy, G., Lefèvre, Y., Becker, M., Frochot, H., Picard, J.F., & Wagner, P.A. (1999). Les excès d'eau : influence sur la croissance des chênes. *Revue Forestière Française*, LI (2), 151-161.
- Linkosalo, T., Häkkinen, R., Terhivuo, J., Tuomenvirta, H., & Hari, P. (2008). The time series of flowering and leaf bud burst of boreal trees (1846-2005) support the direct temperature observations of climatic warming. *Agricultural and Forest Meteorology*, In Press, Corrected Proof, 9.
- Lucot, E. & Bruckert, S. (1992). Organisation du système racinaire du chêne pédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). *Ann. For. Sci.*, 49, 465-479.
- Mac Nab, W.H. (1993). A topographic Index to Quantify the Effects of Mesoscale Landform on Site Productivity. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 1100-1107.
- Manion, P.D. (1981). *Tree disease concepts*. Prentice Hall. pp 324. Englewood Cliffs N.J.
- Marçais, B., Bouho-Delduc, L., & Le Tacon, F. (2000). Effets possibles des changements globaux sur les micro-organismes symbiotiques et pathogènes et les insectes ravageurs des forêts. *Revue Forestière Française*, numéro spécial, 99-118.
- Masson, G. (2005). *Autécologie des essences forestières. Comment installer chaque essence à sa place* Vol. 2, pp 399. Lavoisier, Londres, Paris, New York.
- Maurel, M. (2001). *Impact écophysiological sur jeunes chênes et châtaigniers de l'infection racinaire par *Phytophthora cinnamomi**. Doctorat, Université de Paris.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kubler, K., Bissolli, P., Braslavska, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatzcak, K., Mage, F., Mestre, A., Nordli, O.,

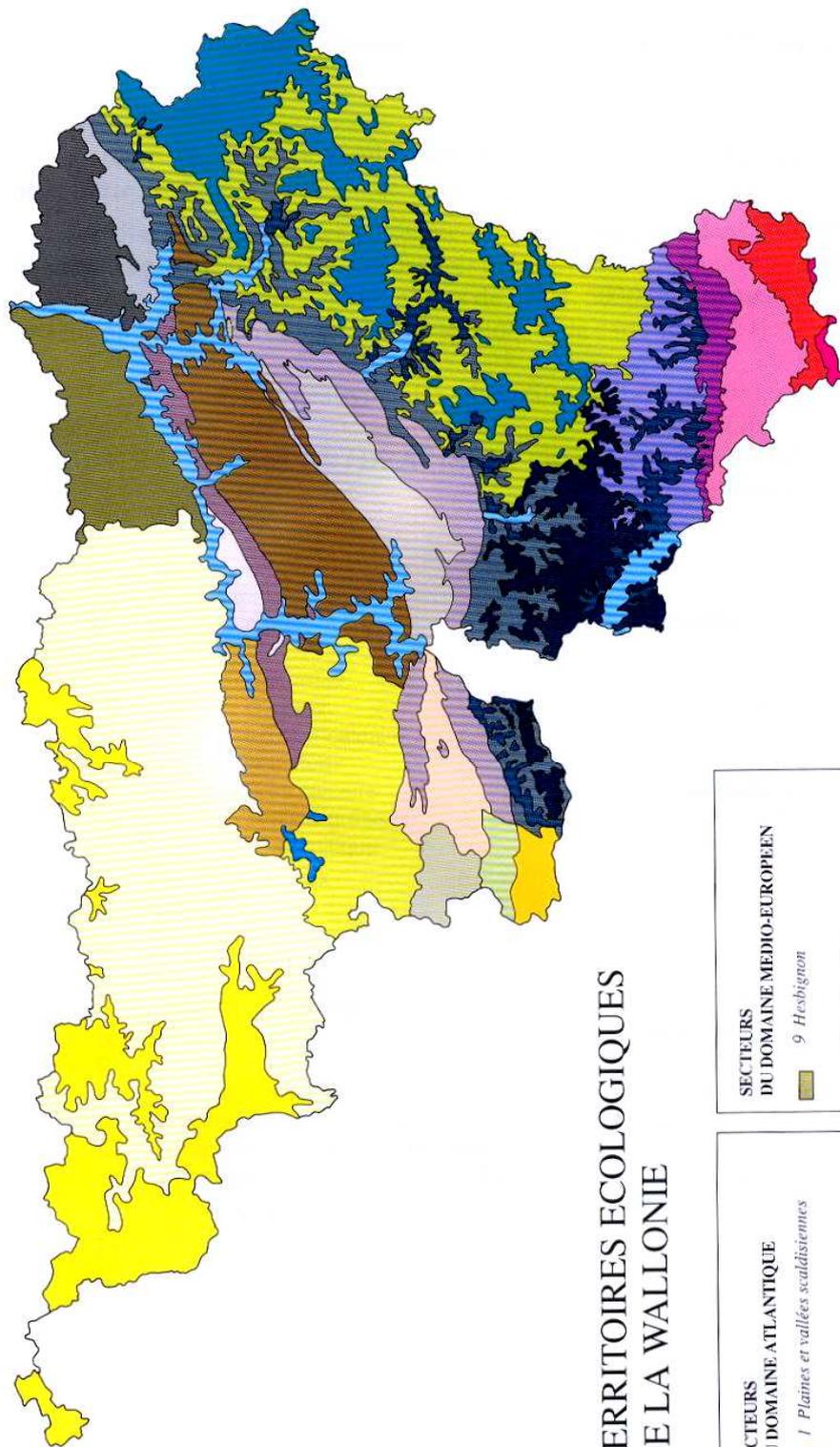
- Penuelas, J., Pirinen, P., Remisova, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., & Züst, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12 (10), 1969-1976.
- Moisselin, J.M., Canelas, M., Schneider, M., & Dubuisson, B. (2003) Les longues séries de référence pour l'étude des changements climatiques. In Actes des journées AMA (ed T. Météo-France), pp. 95-98, Toulouse.
- Monserud, R., Moody, U., & Breuer, D. (1990). A soil-site study for inland Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 686-695.
- Nageleisen, L.-M. (1994). Le dépérissement actuel des feuillus divers: hêtre, merisier, alisier torminal, érable sycomore, peuplier, châtaignier, charme, aulne glutineux. *Revue Forestière Française*, XLVI (5-1994), 554-562.
- Nageleisen, L.-M. (2005). Dépérissement du hêtre :présentation d'une méthode symptomatologique de suivi. *Revue Forestière Française*, LVII (2-2005), 255-262.
- Nageleisen, L.-M. & Huart, O. (2005). Problèmes sanitaires d'actualité en Hêtraie: la maladie du Hêtre dans les Ardennes. *Revue Forestière Française*, LVII (2-2005), 249-254.
- Ningre, N. & Colin, F. (2007). Frost damage on the terminal shoot as a risk factor of fork incidence on common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Ann. For. Sci.*, 64, 79-86.
- Noirfalise, A. (1984). *Forêts et stations forestières en Belgique*, pp 234 p. Presses Agronomiques, Gembloux.
- Nunn, A.J., Kozovits, A.R., Reiter, I.M., Heerdt, C., Leuchner, M., Lütz, C., Liu, X., Lo'w, M., Winkler, J.B., Grams, T.E.E., Häberle, K.-H., Werner, H., Fabian, P., Rennenberg, H., & Matussek, R. (2005). Comparison of ozone uptake and sensitivity between a phytotron study with young beech and a field experiment with adult beech (*Fagus sylvatica*). *Environmental Pollution*, 137 (3), 494-506.
- Olszyk, D.M., Wise, C., VanEss, E., & Tingey, D.T. (1998). Elevated temperature but not elevated CO2 affects long-term patterns of stem diameter and height of douglas-fir seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 28 (7), 1046-1054.
- Pal, J.S. & Giorgi, F. (2004). Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. *Geophys. Res. Lett.*, 31.
- Paoletti, E. (2008). Ozone and urban forests in Italy. *Environmental Pollution*, In Press, Corrected Proof.
- Paoletti, E., Anselmi, N., & Franceschini, A. (2007). Pre-Exposure to Ozone Predisposes Oak Leaves to Attacks by *Diplodia corticola* and *Biscogniauxia mediterranea*. *The Scientific World Journal*, 7, 222-230.
- Pryor, S., Barthelmie, R., & Kjellström, E. (2005a). Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. *Climate Dynamics*, 25 (7), 815-835.

- Pryor, S., Schoof, J.T., & Barthelmie, R. (2005b). Climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: empirical downscaling of multiple AOGCMs. *Climate Research*, 29, 183-198.
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelsson, P., & Willén, U. (2004). European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics*, 22 (1), 13-31.
- Rameau, J.C., Mansion, D., & Dume, G. (1989). *Flore forestière française : Guide écologique illustré. Vol. 1, Plaines et collines*, pp 1785 p. IDF (Institut pour le Développement Forestier), Paris.
- Reader, R.J., Jalili, A., Grime, J.P., Spencer, R.E., & Matthews, N. (1993). A comparative study of plasticity in seedling rooting depth in drying soil. *Journal of Ecology*, 81 (543-550).
- Reuter, J.-C. (2005). *Bilan de la santé des forêts en 2004*. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, République Française.
- Rouault, G., Candau, J.-N., Lieuter, F., Nageleisen, L.-M., Martin, J.-C., & Warzée, N. (2006). Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.*, 63, 613-624.
- Salinger, M. (2005). Climate Variability and Change: Past, Present and Future - An Overview. *Climatic Change*, 70 (1), 9-29.
- Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, O., Ryan, M.G., & Vourlitis, G. (2001). Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149 (3), 369-399.
- Saxe, H., Ellsworth, D.S., & Heath, J. (1998). Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. *New Phytologist*, 139 (3), 395-436.
- Schmull, M. & Thomas, F.M. (2000). Morphological and physiological reactions of young deciduous trees (*Quercus robur* L., *Q. petraea* [Matt.] Liebl., *Fagus sylvatica* L.) to waterlogging. *Plant and Soil*, 225, 227-242.
- Seguin, B. (2007). *Les changements climatiques et les impacts observés sur les écosystèmes terrestres*. In *Rendez-vous technique, hors série n°3 : Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques* (ed ONF), pp. 3-8.
- Semenov, V. & Bengtsson, L. (2002). Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, 19 (2), 123-140.
- Siwkcki, R. & Ufnalski, K. (1998). Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *Forest Pathology*, 28 (2), 99-112.
- Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J., & Meehl, G. (2006). Going to the Extremes. *Climatic Change*, 79 (3), 185-211.

- Thomas, F.M. & Ahlers, U. (1999). Effects of excess nitrogen on frost hardiness and freezing injury of above-ground tissue in young oaks (*Quercus petraea* and *Q. robur*). *New Phytologist*, 144 (1), 73-83.
- Thomas, F.M., Blank, R., & Hartmann, G. (2002). Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology*, 32 (4-5), 277-307.
- Thomas, F.M. & Büttner, G. (1998). Nutrient relations in healthy and damaged stands of mature oaks on clayey soils: two case studies in northwestern Germany. *Forest Ecology and Management*, 108 (3), 301-319.
- Thomas, F.M. & Runge, M. (1992). Proton Neutralization in the Leaves of English Oak (*Quercus robur* L.) Exposed to Sulphur Dioxide. *J. Exp. Bot.*, 43 (6), 803-809.
- Timbal, J. & Aussenac, G. (1996). An overview of ecology and silviculture of indigenous oaks in France. *Ann. For. Sci.*, 53, 649-661.
- Triboulot, M.B., Fauveau, M.L., Bréda, N., Label, P., & Dreyer, E. (1996). Stomatal conductance and xyleme-sap abscisic acid (ABA) in adult oak trees during a gradually imposed drought. *Ann. For. Sci.*, 53, 207-220.
- Ulrich, E. (2005). Effets de l'ozone sur la végétation forestière. Introduction générale dans la problématique. *Forêt wallonne*, 79, 34-46.
- van den Hurk, B., Tank, A.K., Lenderink, G., van Ulden, A., van Oldenborgh, G.J., Katsman, C., van den Brink, H., Keller, F., Bessembinder, J., Burgers, G., Komen, G., Hazeleger, W., & Drijfhout, S. (2006). *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. KNMI, Netherlands.
- van Hees, A.F.M. (1997). Growth and morphology of pedunculate oak (*Quercus robur* L) and beech (*Fagus sylvatica* L) seedlings in relation to shading and drought. *Ann. For. Sci.*, 54, 9-18.
- van Mantgem, P.J. & Stephenson, N.L. (2007). Apparent climatically induced increase of tree mortality rates in a temperate forest. *Ecology Letters*, 10 (10), 909-916.
- van Praag, H.J. & Weissen, F. (1986). Foliar mineral composition, fertilization and dieback of Norway spruce in the Belgian Ardennes. 1, 169-176.
- Vitlox, O., van Slycken, J., & al., e. (2000). *Régénération naturelle de la forêt de Soignes - rapport 1*. Fonds Société Générale de Belgique pour la Forêt de Soignes, Bruxelles.
- Vitlox, O., van Slycken, J., & al., e. (2001). *Régénération naturelle de la forêt de Soignes - rapport 2*. Fonds Société Générale de Belgique pour la Forêt de Soignes, Bruxelles.
- Vivin, P., Aussenac, G., & Lévy, G. (1993). Differences in drought resistance among 3 deciduous oak species grown in large boxes. *Ann. For. Sci.*, 50, 221-233.

- Vivin, P., Guehl, J.-M., Clément, A., & Aussenac, G. (1996). The effects of elevated CO₂ and water stress on whole plant CO₂ exchange, carbon allocation and osmoregulation in oak seedlings. *Ann. For. Sci.*, 53, 447-459.
- Voss, R., May, W., & Roeckner, E. (2002). Enhanced resolution modelling study on anthropogenic climate change: changes in extremes of the hydrological cycle. *International Journal of Climatology*, 22 (7), 755-777.
- Weissen, F., Baix, P., Boseret, J.P., Bronchart, L., Lejeune, M., Maquet, P., Marchal, D., Marchal, J.L., Masson, C., Onclinckx, F., Sandron, P., Schmitz, L., Godeaux, P., Lambert, D., Marneffe, C., & Piret, A. (1991). *Le fichier écologique des essences. Fasc. 2 : Fiches techniques*, pp 190 p. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Namur.
- Weissen, F., van Praag, H.J., André, P., & Maréchal, P. (1992). Causes du dépérissement des forêts en Ardennes: observations et expérimentation. *Silva Belgica*, 99 (1), 9-13.
- Zwiers, F.W. & Kharin, V.V. (1998). Changes in the Extremes of the Climate Simulated by CCC GCM2 under CO₂ Doubling. *Journal of Climate*, 2200-2222.

Annexe 1 – territoires écologiques



TERRITOIRES ECOLOGIQUES DE LA WALLONIE

SECTEURS DU DOMAINE ATLANTIQUE

- 1 Plaines et vallées scaldisiennes
- 2 Hesbino-Brabançon
- 3 Vallées inférieures et moyennes du bassin mosan
- 4 Pays sambrien
- 5 Sambre - Condrusien
- 6 Fagne atlantique
- 7 Calesiennisme atlantique
- 8 Thiérache

SECTEURS DU DOMAINE MEDIO-EUROPEEN

- 9 Hesbignon
- 10 Vallées inférieures et moyennes du bassin mosan
- 11 Terroir Vesdre
- 12 Pays meusien
- 13 Calesiennisme
- 14 Marlagne et Ardenne condruisienne
- 15 Pays de Herve
- 16 Condroz et Condroz oriental

- 17 > Famenne - Fagne
- 17
- 18 Vallées supérieures des affluents mosans
- 19 Ardenne méridionale
- 20 Ardenne atlantique et bassin ardennais
- 21 Ardenne occidentale
- 22 Ardenne centro-orientale
- 23 Haute Ardenne
- 24 Vallées supérieures de la Semois et de l'Altert
- 25 Côtes de Florenville
- 26 Côtes d'Ethe et de Messancy
- 27 Côtes de Moselle

Annexe 2 – Compaction des sols et fragipan

Introduction

La compaction des sols reste un phénomène très complexe. Complexe de par son origine (anthropique ou non), de par les facteurs intervenant dans ce processus et de par les conséquences qu'elle peut avoir sur la végétation herbacée, mais également arbustive et arborée. En effet, cette compaction aura des conséquences sur l'enracinement (profondeur, volume exploité) et donc sur l'alimentation en eau et la stabilité des arbres, ainsi que sur le fonctionnement du sol (réserve utile et engorgement, niveau trophique). Ces conséquences du point de vue stationnel et sylvicole seront à intégrer dans la problématique prévisionnelle d'un réchauffement climatique.

Différentes origines à une compaction sont possibles. Elles sont reprises dans le tableau 1. Ces origines ne s'excluent bien entendu pas l'une l'autre, elles peuvent agir de concert.

Tableau 1 - Différentes origines de la compaction des sols dans le cas de la forêt de Soignes

Origine anthropique	
<i>Exploitation forestière :</i>	Le passage des engins forestiers (harvester, forwarder, grapple skidder, etc) lors de l'abattage et du débusquage. Dans une moindre mesure, l'exploitation du bois de chauffage.
<i>Circulation en forêt :</i>	La circulation en forêt est réglementée et les différents utilisateurs (piétons, cyclistes, cavaliers) sont cantonnés à des sentiers adaptés, la compaction étant localisée à ces sentiers. Il n'en pas toujours été le cas. Précédemment, des zones ont été entièrement ouvertes au public (zones piétons, zones cavaliers). Une section ultérieure cartographiera ces zones et entamera la réflexion d'un éventuel impact significatif sur la compaction des sols en relation avec les peuplements forestiers en place.
Origine non anthropique	
<i>Fragipan :</i>	Omniprésent en forêt de Soignes, le <i>Fragipan</i> pose un phénomène toute particulier. Problématique particulière face au comportement racinaire des arbres, face aux comportements hydriques de ces sols. Dans le cadre d'un réchauffement climatique, ce facteur est incontestablement à prendre en compte. Vu son importance, une section bibliographique lui est dédiée ultérieurement, ainsi que dans la méthodologie cherchant à déduire sa présence sur la zone d'étude.
<i>Peuplement :</i>	Cet effet peuplement consiste au balancement "oscillatoire" des arbres face aux vents. Pour les individus de grandes circonférences, ce balancement provoque des compacions localisées autour de ceux-ci.

La suite de cette partie « compaction des sols » s'articule autour des trois titres suivants :

- Le *Fragipan*, comment, où et importance : cette section reprend l'état des connaissances actuelles sur ce phénomène.
- Autres facteurs de compaction : cette section reprend les autres grands problèmes de compaction, mis en évidence notamment lors d'études concernant la régénération naturelle du hêtre.
- Identifier et quantifier cette compaction : dans un soucis d'intégration de cette composante dans la détermination d'unités stationnelles, cette partie reprend les

méthodologies qui permettent de qualifier et quantifier ces phénomènes de compaction.

Le Fragipan

Définition

« Horizon de profondeur de texture moyenne, à densité apparente élevée par rapport aux horizons qui l'entourent. Il est dur et compact lorsqu'il est sec et, à l'état humide, les unités structurales éclatent brusquement lorsqu'on les presse entre les doigts. La teneur en matière organique est faible de même que la perméabilité (le drainage est donc imparfait). Il présente des fractures blanchies, de texture plus grossière et de forme polygonale. On observe des revêtements argileux et des taches discontinues sur les faces et à l'intérieur des polyèdres. On le trouve généralement sous un horizon B. Il peut avoir 15 à 200 centimètres d'épaisseur. Celle-ci a tendance à augmenter lorsque les conditions de drainage deviennent moins favorables. Il présente une transition abrupte avec l'horizon sus-jacent et graduelle ou diffuse avec l'horizon sous-jacent » (Soil Taxonomy in (Lozet & Mathieu, 1990)).

« En Europe occidentale, sa genèse semble être liée aux glaciations quaternaires et spécialement à la glaciation du Würm. Cet horizon aurait été compacté entre le sous-sol continuellement gelé et la partie superficielle gelée pendant la période froide » (Lozet in (Lozet & Mathieu, 1990)).

« L'horizon E peut déjà présenter les caractéristiques de l'horizon Fragipan. Dans ce cas, il ne correspond plus parfaitement à la définition de la Soil Taxonomy » (Langohr in (Lozet & Mathieu, 1990)).

Origine

La question des origines du *Fragipan* pose encore quelques interrogations. Plusieurs hypothèses ont été exposées dans la littérature. Si l'on désire simplifier, deux « écoles » font office :

- Théorie de l'héritage périglaciaire : dans des régions qui dans le passé ont été intensivement soumises à des conditions périglaciaires, la compression exercée par la glace durant la formation du permafrost ou bien la masse des glaces présentes au-dessus du sol semblent être l'explication la plus plausible (Bryant, 1989; Van Vliet & Langohr, 1981).
- Alternance desiccation/humectation : dans d'autres régions, l'alternance de cycles desiccation/humectation (Attou & Bruand, 1998) ou l'effondrement de dépôts liquéfiés, saturés en eau (Assallay et al., 1998) sont invoqués comme cause de la compaction.

Concernant la zone d'étude qui nous occupe, c'est la théorie de l'héritage périglaciaire, véhiculée par Van Vliet & Langohr (1981) qui est privilégiée. Cette compaction touche plus particulièrement les sols limoneux. Dans la Carte Numérique des Sols de Wallonie, la composante *Fragipan* n'est pas mise en évidence tel quel (voir encadré « Pourquoi ce *Fragipan* n'est pas renseigné par la carte numérique des sols »). Le phénomène reste principalement lié aux sols possédant un développement de profil c, horizon B textural fortement tacheté (textures A & L qui correspondent à ce qui est rencontré sur la zone d'étude) ou morcelé (cas des textures Z, S, P). Les sols ayant un développement de profil

a(b) sont également concernés (Bock L., communication personnelle). D'un point de vue surfacique, les deux grands types de sols présents sur la zone, à savoir Abc et Aba(ba) sont inclus dans la problématique.

Pourquoi ce Fragipan n'est pas renseigné par la Carte Numérique des Sols ?

La Carte Numérique des Sols a été réalisée sur base de la Carte des Sols de la Belgique, éditée par le Comité pour l'établissement de la carte des sols et de la végétation de la Belgique. Cette dernière, pour la zone concernée par cette convention, date de 1959. Hors, la mise en évidence des origines et de la description du *Fragipan* survient au tout début des années 70. Ce paramètre n'a donc pas été pris en compte en tant que tel. Dans la construction d'un catalogue des stations et pour définir au mieux les potentialités sylvicoles des différentes Unités Stationnelles, il s'agira de décrypter les symboles pédologiques utilisés à l'époque afin de « détecter » la probable présence de cette couche indurée. En effet, ce phénomène « *Fragipan* » n'a pas été occulté pour autant. L'horizon B textural tacheté est renseigné par un profil c. Les sols à texture limoneuse et possédant cet horizon Bt fortement tacheté sont susceptibles d'« accueillir » ce phénomène de couche indurée, à des degrés de compaction divers.

Distribution

Dans la nomenclature internationale, les sols « Abc » et « Aba(b) » sont considérés comme des Albeluvisols. Un constat concernant les albeluvisols est une distribution large dans les régions à conditions climatiques plus froides que chez nous. Ce constat rejoint la théorie « héritage périglaciaire » de formation de ce *Fragipan* (voir section « *Origine* »).

De part son origine quaternaire, cette couche s'est formée sur l'ensemble du plateau limoneux. Au Néolithique, l'agriculture sur brûlis est apparue. Cette agriculture, de part ses déplacements incessants a détruit cette couche compactée sur une grande part de ce plateau limoneux. Ces agriculteurs l'ont ensuite quitté pour y revenir 2000 ans plus tard avec la découverte du chaulage et la pratique des cultures plus permanentes (Langohr R., communication personnelle). La forêt de Soignes constitue donc un véritable patrimoine et musée naturel de ce point de vue.

Structure

La structure polygonale du *Fragipan* est un élément caractéristique. Une prospection par fosse pédologique mettra facilement en évidence cette structure. Un prélèvement à la tarière mettra en évidence une série de stries ou de tâches ocres, pouvant être interprété par le pédologue novice comme un signe d'hydromorphie. Un profil noté « c », comportant un horizon Bt fortement tacheté dans le cas des textures limoneuses et limono-sableuses, pourra être l'indice d'un *Fragipan* non interprété comme tel par le pédologue opérateur (déjà explicité plus haut).

Les figures 1 et 2 illustrent ce que l'on peut observer du *Fragipan* dans une fosse pédologique. Le profil, en observation verticale, nous révèle plusieurs informations :

- Présence de glosses moins dense, le pénétromètre « de poche » passe plus facilement.

- La structure du *Fragipan* est quasi massique, ferme mais éclatant sous la pression des doigts.
- Cette couche est plastique à l'état humide, dur à l'état sec.

Un profil en escalier, donc en observation horizontale, révèle la structure polygonale du *Fragipan*.



Figure 1 - Photo d'une fosse pédologique du Prof. Langohr avec horizon *Fragipan* caractéristique (photo, X. Legrain).



Figure 140 - Coupe horizontale dans l'horizon *Fragipan*, avec illustration du polygone caractéristique (photo: Prof. L. Bock).

Profondeur et Intensité

Comme déjà mentionné, ce sont les sols « Abc » et « Aba(b) » qui d'une part dominant, mais au sein desquels nous avons la plus grande probabilité de retrouver du *Fragipan* à une profondeur inférieure à 120 centimètres. Du point de vue topographique, le *Fragipan* le plus affleurant se cantonne préférentiellement aux plateaux. Les cuvettes et autres dépressions ont reçu des apports de colluvions et alluvions, « reléguant » ainsi la couche indurée à une plus grande profondeur. Ces dépôts ont également pu se réaliser d'une manière préférentielle par rapport à la direction du vent. Ces apports éoliens préférentiels sont observables en forêt de Soignes par une dissymétrie des versants.

L'intensité de la compacité de cette couche indurée n'est pas la même en toute circonstance. En effet, cette couche résulte de phénomènes datant de 10.000 ans avant notre ère. Tout dépend donc de sa conservation à travers les âges. Un exemple de perturbation est le Rouge Cloître. Le sylvopastoralisme d'application à l'époque a développé une pédofaune nécessaire qui a dégradé cette couche de *Fragipan*. Une autre hypothèse résidait dans les peuplements forestiers en place : le chêne, au système racinaire plus « puissant » que le hêtre, peut dans une certaine mesure s'implanter dans ce type de couche, et au fil des temps, la remanier.

L'origine quaternaire de ces sols est maintenant connue. Mais les conditions climatiques et micro-climatiques de l'époque n'étaient pas les mêmes partout. Selon la topographie, l'exposition, les phénomènes de gel ont agité de façon non homogène. De même, ces couches au travers des âges ont subi une relative dégradation, due à des phénomènes d'érosion et autres. Le *Fragipan* le mieux conservé se situera sur des surfaces planes, sur plateaux.

En conclusion, on est donc face à un phénomène « graduel », c'est-à-dire hétérogène par rapport à sa formation et son éventuelle dégradation.

Un des objectifs de la phase « validation terrain » en vue de construire le catalogue des stations sera de vérifier s'il existe une corrélation entre le *Fragipan* (présence, profondeur, intensité) et la topographie.

Relation avec l'hydromorphie

Point de vue comportement imperméable, deux éléments interviennent : la compacité, mais également la structure. Il est indéniable que la micro-structure du *Fragipan* freine les flux d'eau. Cependant, considérer ce *Fragipan* comme une couche totalement imperméable ne correspond pas nécessairement à la réalité. De plus, plusieurs conduites de fuite pour l'eau existent dans ce *Fragipan* : cracks (formant les polyèdres caractéristiques), racines mortes, autres discontinuités. D'une manière générale, cette couche freine donc les flux vers le bas (infiltration), mais également vers le haut (remontée capillaire) ce qui pose un facteur limitant important lors d'éventuels épisodes de sécheresse.

Si l'on s'intéresse à la présence d'une nappe d'eau en relation avec un *Fragipan*, plusieurs cas de figure peuvent être rencontrés :

- Le *Fragipan* peut se retrouver sur des parcelles où l'on retrouve une nappe fonctionnelle, mais également où cette dernière ne l'est plus. On parle alors d'un *Fragipan* d'héritage (Briquemont, 1985).
- Dans certains cas, le *Fragipan* peut avoir une relation étroite avec la présence d'une nappe (Henquin, 1985).
- Dans d'autres cas, le *Fragipan* ne peut justifier à lui seul la présence d'une nappe (Briquemont, 1985).

Le *Fragipan*, par le ralentissement des flux d'infiltration peut occasionner la présence d'une nappe temporaire en fonction des précipitations de la région (Briquemont, 1985; Henquin, 1985).

Bibliographie

Assallay, A.M., Jefferson, L., Rogers, C.D.F., & Smalley, I.J. (1998). *Fragipan* formation in loess soils: development of the Bryant hydroconsolidation hypothesis. *Geoderma*, 83, 1-16.

Attou, F. & Bruand, A. (1998). Experimental study of 'fragipans' formation in soils. Role of both clay dispersion and wetting-drying cycles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series Earth and Planetary Sciences*, 326, 545-552.

Briquemont, P. (1985) Etude intégrée d'une séquence de sols et de leur comportement hydrique : cas particulier des fragipans sur la Cuesta Bajocienne en Gaume., pp. 98 p. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

Bryant, R.B. (1989). *Physical processes of fragipan formation*. In Smeck, N.E., Ciolkosz, E.J. (Eds.), *Fragipans: Their Occurrence, Classification, and genesis*. SSSA, Madison, WI, pp. 141-150.

Henquin, B. (1985). *Etude intégrée d'une séquence de sols et de leur comportement hydrique : cas particulier des fragipans dans la forêt d'Anlier (Ardenne Méridionale)*, pp 98 p.

Lozet, J. & Mathieu, C. (1990). *Dictionnaire de science du sol avec index anglais-français*. Vol. 2e éd., pp VIII, 384 p. Technique et Documentation-Lavoisier, Paris.

Van Vliet, B. & Langohr, R. (1981). Correlation between fragipans and permafrost with special reference to silty Weichselian deposits in Belgium and Northern France. *Catena*, 8, 137-153.

Annexe 3 – Croisements sols X phytosociologie

Annexes

	Abc	Aba(b)	Aba	Abp	Acp	Adp	ADc	gADc	uLDc	sAbc	sLbc	SAF	ZAF	Zag	Total
<i>Fago-Quercetum</i>	910.0	172.0	7.1	5.9	9.5	42.1	45.6	16.3	7.9	11.9	15.1	11.3	1.5	2.8	1259.1
<i>Quercu-Betuletum</i>	4.3	1.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0
<i>Milio-Fagetum</i>	5.7	2.4	0.0	0.0	0.0	0.7	2.0	0.0	0.0	0.5	0.0	1.9	0.0	0.0	13.2
<i>Stellario-Carpinetum</i>	76.7	26.1	2.3	1.0	6.7	10.5	6.8	2.3	3.6	0.3	0.5	1.0	0.1	0.0	137.9
<i>Endymio-Fagetum</i>	7.7	7.9	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.4
<i>Endymio-Carpinetum</i>	0.0	17.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	0.4	0.0	0.0	20.0
<i>Carici-Fraxinetum et Cardamino-Alnetum</i>	3.4	2.3	0.1	0.4	1.1	0.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	8.5
Total	1007.8	229.1	9.7	8.5	17.3	54.1	55.0	18.6	11.6	13.8	16.8	14.6	1.6	2.8	1461.2

	Abc	Aba(b)	Aba	Abp	Acp	Adp	ADc	gADc	uLDc	sAbc	sLbc	SAF	ZAF	Zag	Total
<i>Fago-Quercetum</i>	90.3	75.1	73.7	70.3	54.7	77.9	83.0	87.4	68.7	86.3	89.8	77.4	94.1	100.0	86.2
<i>Quercu-Betuletum</i>	0.4	0.4	2.1	2.8	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
<i>Milio-Fagetum</i>	0.6	1.0	0.0	0.0	0.0	1.3	3.6	0.0	0.0	3.7	0.0	13.0	0.0	0.0	0.9
<i>Stellario-Carpinetum</i>	7.6	11.4	23.6	11.8	38.7	19.4	12.3	12.6	31.3	2.4	3.0	6.9	5.9	0.0	9.4
<i>Endymio-Fagetum</i>	0.8	3.4	0.0	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1
<i>Endymio-Carpinetum</i>	0.0	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	6.3	2.8	0.0	0.0	1.4
<i>Carici-Fraxinetum et Cardamino-Alnetum</i>	0.3	1.0	0.6	5.1	6.6	1.1	0.8	0.0	0.0	0.3	0.9	0.0	0.0	0.0	0.6
Total	100.0														

	Abc	Aba(b)	Aba	Abp	Acp	Adp	ADc	gADc	uLDc	sAbc	sLbc	SAF	ZAF	Zag	Total
<i>Fago-Quercetum</i>	72.3	13.7	0.6	0.5	0.8	3.3	3.6	1.3	0.6	0.9	1.2	0.9	0.1	0.2	100.0
<i>Quercu-Betuletum</i>	72.2	16.2	3.4	3.9	0.0	2.3	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
<i>Milio-Fagetum</i>	43.2	18.0	0.0	0.0	0.0	5.5	15.1	0.0	0.0	3.9	0.0	14.3	0.0	0.0	100.0
<i>Stellario-Carpinetum</i>	55.6	19.0	1.7	0.7	4.9	7.6	4.9	1.7	2.6	0.2	0.4	0.7	0.1	0.0	100.0
<i>Endymio-Fagetum</i>	46.8	48.0	0.0	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
<i>Endymio-Carpinetum</i>	0.0	87.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	5.3	2.0	0.0	0.0	100.0
<i>Carici-Fraxinetum et Cardamino-Alnetum</i>	39.5	26.5	0.7	5.1	13.5	7.3	5.2	0.0	0.0	0.5	1.8	0.0	0.0	0.0	100.0
Total	69.0	15.7	0.7	0.6	1.2	3.7	3.8	1.3	0.8	0.9	1.2	1.0	0.1	0.2	100.0

Annexes

	Abc	Aba(b)	Aba	Abp	Acp	Adp	ADc	gADc	uLdc	sAbc	sLbc	SAF	Zag	Total
<i>hêtraie à Leucobryum glaucum</i>	4.5	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	5.8
<i>chênaie à myrtille et canche flexueuse</i>	3.8	0.7	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.8
Somme	8.3	1.6	0.0	0.2	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	10.6
<i>hêtraie à canche flexueuse</i>	55.8	3.9	0.2	0.0	0.0	0.3	0.3	5.2	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	66.0
<i>hêtraie à canche flexueuse et grande luzule</i>	12.0	1.3	0.3	0.1	0.0	0.4	0.1	4.6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	19.0
<i>hêtraie à grande luzule</i>	28.2	14.5	2.1	2.2	0.9	2.3	0.3	1.6	0.0	1.3	1.6	1.6	0.5	57.2
Somme	96.1	19.8	2.7	2.3	0.9	3.0	0.7	11.4	0.1	1.3	1.7	1.8	0.5	142.2
<i>hêtraie à molinie et bruyère</i>	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
Somme	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5
<i>hêtraie ou chênaie à fougère-aigle, et chèvrefeuille</i>	11.8	28.2	0.0	0.0	0.0	1.8	2.9	0.2	4.6	6.4	3.5	4.0	0.0	63.6
<i>hêtraie à fougères</i>	221.5	39.1	1.0	0.6	6.1	12.9	20.1	2.3	3.1	0.2	6.3	0.7	1.6	315.4
Somme	233.3	67.4	1.0	0.6	6.1	14.7	23.0	2.5	7.8	6.5	9.8	4.6	1.6	378.9
<i>hêtraie à millet, fougères et ronces</i>	249.0	33.5	0.0	1.6	0.0	13.0	3.2	0.8	0.0	3.1	0.2	2.1	0.0	306.7
Somme	249.0	33.5	0.0	1.6	0.0	13.0	3.2	0.8	0.0	3.1	0.2	2.1	0.0	306.7
<i>hêtraie ou chênaie à lamier jaune</i>	0.7	0.5	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0
Somme	0.7	0.5	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0
<i>chênaie mixte</i>	61.4	18.7	0.6	0.4	2.5	4.0	5.4	0.3	3.4	0.7	0.5	1.3	0.0	99.1
Somme	61.4	18.7	0.6	0.4	2.5	4.0	5.4	0.3	3.4	0.7	0.5	1.3	0.0	99.1
<i>frênaie chênaie mélangée</i>	22.4	7.6	0.2	0.4	3.5	2.0	8.6	1.9	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	47.3
Somme	22.4	7.6	0.2	0.4	3.5	2.0	8.6	1.9	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	47.3
<i>hêtraie à anémone et jacinthe</i>	96.5	8.1	0.5	0.0	2.4	0.9	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	111.1
<i>chênaie à jacinthe</i>	0.0	14.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	0.4	0.0	17.1
<i>chênaie à jacinthe et fougère-aigle</i>	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3
Somme	96.5	25.1	0.5	0.0	2.4	0.9	2.6	0.0	0.0	1.0	1.1	0.4	0.0	130.5
<i>hêtraie calcicole à mercuriale</i>	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	1.9	0.0	3.5
Somme	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	1.9	0.0	3.5
<i>frênaie à carex</i>	3.6	2.9	0.1	0.4	1.7	0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	10.0
<i>saussaie, aulnaie</i>	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
<i>marécages sensu lato</i>	0.2	0.0	0.0	0.1	0.3	1.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.1	0.2	2.5
Somme	3.8	2.9	0.2	0.6	2.0	1.8	0.4	0.0	0.0	0.3	0.4	0.1	0.2	12.6
Total	772.9	177.5	5.3	6.0	17.4	42.0	44.0	17.0	11.2	13.5	13.8	13.1	2.2	1135.8

	Abc	Aba(b)	Aba	Abp	Acp	Adp	ADc	gADc	uLdc	sAbc	sLbc	SAF	Zag	Total
<i>hêtraie à Leucobryum glaucum</i>	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4	1.4	0.0	0.5
<i>chênaie à myrtille et canche flexueuse</i>	0.5	0.4	0.5	2.7	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
Somme	1.1	0.9	0.5	2.7	0.0	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4	1.4	0.0	0.9
<i>hêtraie à canche flexueuse</i>	7.2	2.2	3.4	0.0	0.0	0.7	0.6	30.8	0.5	0.0	0.8	0.9	0.0	5.8
<i>hêtraie à canche flexueuse et grande luzule</i>	1.6	0.7	6.4	1.2	0.2	1.0	0.2	26.9	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	1.7
<i>hêtraie à grande luzule</i>	3.7	8.2	40.7	36.3	5.1	5.4	0.8	9.2	0.0	9.8	11.7	12.6	21.0	5.0
Somme	12.4	11.2	50.5	37.5	5.3	7.1	1.6	66.9	0.5	9.8	12.5	14.0	21.0	12.5
<i>hêtraie à molinie et bruyère</i>	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Somme	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
<i>hêtraie ou chênaie à fougère-aigle, et chèvrefeuille</i>	1.5	15.9	0.9	0.0	0.0	4.2	6.7	1.2	41.5	47.2	25.7	30.4	0.0	5.6
<i>hêtraie à fougères</i>	28.7	22.1	19.0	9.7	35.0	30.7	45.6	13.3	27.8	1.3	45.6	5.2	70.2	27.8
Somme	30.2	38.0	19.9	9.7	35.0	35.0	52.3	14.5	69.3	48.5	71.3	35.6	70.2	33.4
<i>hêtraie à millet, fougères et ronces</i>	32.2	18.9	0.7	26.5	0.0	31.0	7.4	5.0	0.0	23.1	1.6	16.1	0.0	27.0
Somme	32.2	18.9	0.7	26.5	0.0	31.0	7.4	5.0	0.0	23.1	1.6	16.1	0.0	27.0
<i>hêtraie ou chênaie à lamier jaune</i>	0.1	0.3	0.0	0.7	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
Somme	0.1	0.3	0.0	0.7	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3
<i>chênaie mixte</i>	7.9	10.5	12.1	6.9	14.1	9.5	12.2	1.5	30.2	5.0	3.6	9.8	0.0	8.7
Somme	7.9	10.5	12.1	6.9	14.1	9.5	12.2	1.5	30.2	5.0	3.6	9.8	0.0	8.7
<i>frênaie chênaie mélangée</i>	2.9	4.3	4.0	6.5	19.9	4.8	19.5	11.4	0.0	0.0	0.0	5.2	0.0	4.2
Somme	2.9	4.3	4.0	6.5	19.9	4.8	19.5	11.4	0.0	0.0	0.0	5.2	0.0	4.2
<i>hêtraie à anémone et jacinthe</i>	12.5	4.6	9.2	0.0	14.1	2.2	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8
<i>chênaie à jacinthe</i>	0.0	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.4	7.7	3.0	0.0	1.5
<i>chênaie à jacinthe et fougère-aigle</i>	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
Somme	12.5	14.1	9.2	0.0	14.1	2.2	6.0	0.0	0.0	7.4	7.7	3.0	0.0	11.5
<i>hêtraie calcicole à mercuriale</i>	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	14.4	0.0	0.3
Somme	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	14.4	0.0	0.3
<i>frênaie à carex</i>	0.5	1.6	2.5	7.1	9.6	1.6	0.9	0.0	0.0	0.3	1.1	0.0	0.0	0.9
<i>saussaie, aulnaie</i>	0.0	0.0	0.7	1.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>marécages sensu lato</i>	0.0	0.0	0.0	1.2	1.7	2.6	0.0	0.0	0.0	2.0	1.8	0.6	8.8	0.2
Somme	0.5	1.7	3.1	9.5	11.6	4.2	0.9	0.0	0.0	2.3	2.9	0.6	8.8	1.1
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Annexes

	Abc	Aba(b)	Aba	Abp	Acp	Adp	ADc	gADc	uLDc	sAbc	sLbc	SAF	Zag	Total
<i>hêtraie à Leucobryum glaucum</i>	78.2	16.2	0.0	0.0	0.0	0.7	0.9	0.0	0.0	0.0	0.9	3.1	0.0	100.0
<i>chênaie à myrtille et canche flexueuse</i>	79.4	13.6	0.6	3.3	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
Somme	78.8	15.0	0.3	1.5	0.0	1.8	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	1.7	0.0	100.0
<i>hêtraie à canche flexueuse</i>	84.6	6.0	0.3	0.0	0.0	0.4	0.4	7.9	0.1	0.0	0.2	0.2	0.0	100.0
<i>hêtraie à canche flexueuse et grande luzule</i>	63.5	7.0	1.8	0.4	0.1	2.2	0.5	24.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	100.0
<i>hêtraie à grande luzule</i>	49.4	25.4	3.7	3.8	1.6	3.9	0.6	2.7	0.0	2.3	2.8	2.9	0.8	100.0
Somme	67.6	13.9	1.9	1.6	0.6	2.1	0.5	8.0	0.0	0.9	1.2	1.3	0.3	100.0
<i>hêtraie à molinie et bruyère</i>	85.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
Somme	85.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
<i>hêtraie ou chênaie à fougère-aigle, et chèvrefeuille</i>	18.6	44.4	0.1	0.0	0.0	2.8	4.6	0.3	7.3	10.0	5.6	6.2	0.0	100.0
<i>hêtraie à fougères</i>	70.2	12.4	0.3	0.2	1.9	4.1	6.4	0.7	1.0	0.1	2.0	0.2	0.5	100.0
Somme	61.6	17.8	0.3	0.2	1.6	3.9	6.1	0.6	2.0	1.7	2.6	1.2	0.4	100.0
<i>hêtraie à millet, fougères et ronces</i>	81.2	10.9	0.0	0.5	0.0	4.2	1.1	0.3	0.0	1.0	0.1	0.7	0.0	100.0
Somme	81.2	10.9	0.0	0.5	0.0	4.2	1.1	0.3	0.0	1.0	0.1	0.7	0.0	100.0
<i>hêtraie ou chênaie à lamier jaune</i>	24.3	17.5	0.0	1.4	0.0	56.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
Somme	24.3	17.5	0.0	1.4	0.0	56.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
<i>chênaie mixte</i>	62.0	18.8	0.6	0.4	2.5	4.0	5.4	0.3	3.4	0.7	0.5	1.3	0.0	100.0
Somme	62.0	18.8	0.6	0.4	2.5	4.0	5.4	0.3	3.4	0.7	0.5	1.3	0.0	100.0
<i>frênaie chênaie mélangée</i>	47.4	16.1	0.4	0.8	7.3	4.3	18.1	4.1	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	100.0
Somme	47.4	16.1	0.4	0.8	7.3	4.3	18.1	4.1	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	100.0
<i>hêtraie à anémone et jacinthe</i>	86.8	7.3	0.4	0.0	2.2	0.8	2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
<i>chênaie à jacinthe</i>	0.0	85.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	6.2	2.3	0.0	100.0
<i>chênaie à jacinthe et fougère-aigle</i>	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
Somme	73.9	19.2	0.4	0.0	1.9	0.7	2.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.3	0.0	100.0
<i>hêtraie calcicole à mercuriale</i>	0.0	9.4	0.0	0.0	0.0	21.6	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	54.0	0.0	100.0
Somme	0.0	9.4	0.0	0.0	0.0	21.6	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	54.0	0.0	100.0
<i>frênaie à carex</i>	35.9	29.0	1.3	4.3	16.7	6.9	4.1	0.0	0.0	0.4	1.5	0.0	0.0	100.0
<i>saussaie, aulnaie</i>	0.0	0.0	21.3	43.2	35.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0
<i>marécages sensu lato</i>	8.7	1.8	0.0	2.9	11.8	43.1	0.0	0.0	0.0	10.9	9.8	3.1	7.8	100.0
Somme	30.1	23.3	1.3	4.5	16.0	13.9	3.3	0.0	0.0	2.5	3.1	0.6	1.5	100.0
Total	68.1	15.6	0.5	0.5	1.5	3.7	3.9	1.5	1.0	1.2	1.2	1.1	0.2	100.0

Annexe 4 – Tableaux des potentialités 2000 et 2100 pour chaque US, ainsi que le développement méthodologique pour y parvenir

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US1
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	6	2	1	2	2	1	2	2	1	2	11	+1	6	
Quercus robur	6	0	1	0	1	1	1	0	1	0	3		6	
Quercus petraea	6	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0		6	
Quercus rubra	5	-1	1	-1	0	1	0	2	1	2	-1		5	
Acer pseudoplatanus	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6		6	
Fraxinus excelsior	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6		6	
Carpinus betulus	5	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1		5	
Prunus avium	6	0	1	0	1	1	1	1	1	1	4		6	
Robinia pseudoacacia	5	-1	1	-1	0	1	0	2	1	2	-1		5	
Betula pendula	3	0	1	0	1	1	1	1	1	1	4		3	
Résineux											0			
Larix decidua	5	0	1	0	0	1	0	2	1	2	1		5	
Larix kaempferi	6	0	1	0	2	1	2	1	1	1	7		6	
Larix X eurolepis	6	0	1	0	1	1	1	1	1	1	4		6	
Pinus sylvestris	3	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0		3	
Pinus nigra (laricio)	3	0	1	0	0	1	0	2	1	2	1		3	
Pinus nigra (nigra)	3	0	1	0	0	1	0	2	1	2	1		3	
Pinus nigra (koekelare)	6	0	1	0	0	1	0	2	1	2	1		6	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	6	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0		6	
Tilia platyphyllos	6	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1		6	
Castanea sativa	6	-1	1	-1	0	1	0	1	1	1	-2		6	
Juglans regia	6	-1	1	-1	1	1	1	2	1	2	2		6	
Juglans nigra	6	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	2		6	
Juglans intermedia	6	-1	1	-1	1	1	1	2	1	2	2		6	
Cedrus atlantica	4	-3	1	-3	0	1	0	2	1	2	-5		4	
Cedrus libani	4	-3	1	-3	0	1	0	2	1	2	-5		4	
Cedrus deodora	4	-3	1	-3	0	1	0	2	1	2	-5		4	

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US2
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	2	2	2	4	2	2	4	2	2	4	22	+1	3	<---
Quercus robur	1	0	2	0	1	2	2	0	2	0	6		1	
Quercus petraea	1	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		1	
Quercus rubra	1	-1	2	-2	0	2	0	2	2	4	-2		1	
Acer pseudoplatanus	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	11	+1	2	<---
Fraxinus excelsior	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	11	+1	2	<---
Carpinus betulus	1	0	2	0	0	2	0	1	2	2	1		1	<---
Prunus avium	3	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		3	
Robinia pseudoacacia	3	-1	2	-2	0	2	0	2	2	4	-2		3	
Betula pendula	1	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		1	
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		3	
Larix kaempferi	1	0	2	0	2	2	4	1	2	2	13	+1	2	<---
Larix X eurolepis	1	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		1	
Pinus sylvestris	1	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	3	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		3	
Pinus nigra (nigra)	3	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		3	
Pinus nigra (koekelare)	3	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		3	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	1	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		1	
Tilia platyphyllos	2	0	2	0	0	2	0	1	2	2	1		2	
Castanea sativa	2	-1	2	-2	0	2	0	1	2	2	-3		2	
Juglans regia	3	-1	2	-2	1	2	2	2	2	4	4		3	
Juglans nigra	3	-1	2	-2	1	2	2	1	2	2	3		3	
Juglans intermedia	3	-1	2	-2	1	2	2	2	2	4	4		3	
Cedrus atlantica	4	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	3	<---

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US3
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	1	2	2	4	2	2	4	2	2	4	22	+1	2	<---
Quercus robur	2	0	2	0	1	2	2	0	2	0	6		2	
Quercus petraea	1	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		1	
Quercus rubra	1	-1	2	-2	0	2	0	2	2	4	-2		1	
Acer pseudoplatanus	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	11	+1	2	<---
Fraxinus excelsior	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	11	+1	2	<---
Carpinus betulus	1	0	2	0	0	2	0	1	2	2	1		1	
Prunus avium	1	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		1	
Robinia pseudoacacia	1	-1	2	-2	0	2	0	2	2	4	-2		1	
Betula pendula	1	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		1	
Résineux											0			
Larix decidua	1	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		1	
Larix kaempferi	3	0	2	0	2	2	4	1	2	2	13	+1	4	<---
Larix X eurolepis	1	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		1	
Pinus sylvestris	1	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	1	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		1	
Tilia platyphyllos	2	0	2	0	0	2	0	1	2	2	1		2	
Castanea sativa	1	-1	2	-2	0	2	0	1	2	2	-3		1	
Juglans regia	3	-1	2	-2	1	2	2	2	2	4	4		3	
Juglans nigra	3	-1	2	-2	1	2	2	1	2	2	3		3	
Juglans intermedia	3	-1	2	-2	1	2	2	2	2	4	4		3	
Cedrus atlantica	3	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	2	<---
Cedrus libani	3	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	2	<---
Cedrus deodora	3	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	2	<---

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US4
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	6	2	1	2	2	1	2	2	1	2	11	+1	6	
Quercus robur	6	0	1	0	1	1	1	0	1	0	3		6	
Quercus petraea	6	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0		6	
Quercus rubra	6	-1	1	-1	0	1	0	2	1	2	-1		6	
Acer pseudoplatanus	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6		6	
Fraxinus excelsior	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6		6	
Carpinus betulus	6	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1		6	
Prunus avium	6	0	1	0	1	1	1	1	1	1	4		6	
Robinia pseudoacacia	6	-1	1	-1	0	1	0	2	1	2	-1		6	
Betula pendula	3	0	1	0	1	1	1	1	1	1	4		3	
Résineux											0			
Larix decidua	6	0	1	0	0	1	0	2	1	2	1		6	
Larix kaempferi	6	0	1	0	2	1	2	1	1	1	7		6	
Larix X eurolepis	6	0	1	0	1	1	1	1	1	1	4		6	
Pinus sylvestris	3	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0		3	
Pinus nigra (laricio)	6	0	1	0	0	1	0	2	1	2	1		6	
Pinus nigra (nigra)	6	0	1	0	0	1	0	2	1	2	1		6	
Pinus nigra (koekelare)	6	0	1	0	0	1	0	2	1	2	1		6	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	6	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0		6	
Tilia platyphyllos	6	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1		6	
Castanea sativa	6	-1	1	-1	0	1	0	1	1	1	-2		6	
Juglans regia	6	-1	1	-1	1	1	1	2	1	2	2		6	
Juglans nigra	6	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	2		6	
Juglans intermedia	6	-1	1	-1	1	1	1	2	1	2	2		6	
Cedrus atlantica	6	-3	1	-3	0	1	0	2	1	2	-5		6	
Cedrus libani	6	-3	1	-3	0	1	0	2	1	2	-5		6	
Cedrus deodora	6	-3	1	-3	0	1	0	2	1	2	-5		6	

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US5
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	1	2	3	6	2	3	6	2	3	6	33	+2	3	<---
Quercus robur	2	0	3	0	1	3	3	0	3	0	9		2	
Quercus petraea	1	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		1	
Quercus rubra	1	-1	3	-3	0	3	0	2	3	6	-3		1	
Acer pseudoplatanus	2	1	3	3	1	3	3	1	3	3	17	+1	3	<---
Fraxinus excelsior	2	1	3	3	1	3	3	1	3	3	17	+1	3	<---
Carpinus betulus	1	0	3	0	0	3	0	1	3	3	2		1	
Prunus avium	1	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	2	<---
Robinia pseudoacacia	1	-1	3	-3	0	3	0	2	3	6	-3		1	
Betula pendula	1	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	1	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		1	
Larix kaempferi	3	0	3	0	2	3	6	1	3	3	20		3	
Larix X eurolepis	1	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	2	<---
Pinus sylvestris	1	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	1	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		1	
Tilia platyphyllos	4	0	3	0	0	3	0	1	3	3	2		4	
Castanea sativa	1	-1	3	-3	0	3	0	1	3	3	-5		1	
Juglans regia	5	-1	3	-3	1	3	3	2	3	6	6		5	
Juglans nigra	3	-1	3	-3	1	3	3	1	3	3	5		3	
Juglans intermedia	3	-1	3	-3	1	3	3	2	3	6	6		3	
Cedrus atlantica	3	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	2	<---
Cedrus libani	3	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	2	<---
Cedrus deodora	3	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	2	<---

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US6
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	3	2	4	8	2	5	10	2	5	10	51	+3	6	<---
Quercus robur	4	0	4	0	1	5	5	0	5	0	15	+1	5	<---
Quercus petraea	3	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	4	-4	0	5	0	2	5	10	-3		2	
Acer pseudoplatanus	4	1	4	4	1	5	5	1	5	5	26	+1	5	<---
Fraxinus excelsior	4	1	4	4	1	5	5	1	5	5	26	+1	5	<---
Carpinus betulus	2	0	4	0	0	5	0	1	5	5	3		2	
Prunus avium	3	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	4	-4	0	5	0	2	5	10	-3		3	
Betula pendula	1	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		3	
Larix kaempferi	3	0	4	0	2	5	10	1	5	5	33	+2	5	<---
Larix X eurolepis	3	0	4	0	1	5	5	1	5	5	18	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	4	0	0	5	0	2	5	10	5		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	4	0	0	5	0	0	5	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	4	0	0	5	0	1	5	5	3		5	
Castanea sativa	3	-1	4	-4	0	5	0	1	5	5	-6		3	
Juglans regia	5	-1	4	-4	1	5	5	2	5	10	12	+1	6	<---
Juglans nigra	4	-1	4	-4	1	5	5	1	5	5	10		4	
Juglans intermedia	4	-1	4	-4	1	5	5	2	5	10	12		4	
Cedrus atlantica	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	4	-12	0	5	0	2	5	10	-19	-1	3	<---

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US7
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	3	2	3	6	2	4	8	2	5	10	41	+2	5	<---
Quercus robur	4	0	3	0	1	4	4	0	5	0	12	+1	5	<---
Quercus petraea	3	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	3	-3	0	4	0	2	5	10	-1		2	
Acer pseudoplatanus	4	1	3	3	1	4	4	1	5	5	21	+1	5	<---
Fraxinus excelsior	4	1	3	3	1	4	4	1	5	5	21	+1	5	<---
Carpinus betulus	2	0	3	0	0	4	0	1	5	5	3		2	
Prunus avium	3	0	3	0	1	4	4	1	5	5	15	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	3	-3	0	4	0	2	5	10	-1		3	
Betula pendula	1	0	3	0	1	4	4	1	5	5	15	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	3	0	0	4	0	2	5	10	5		3	
Larix kaempferi	3	0	3	0	2	4	8	1	5	5	27	+1	4	<---
Larix X eurolepis	3	0	3	0	1	4	4	1	5	5	15	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	3	0	0	4	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	3	0	0	4	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	3	0	0	4	0	2	5	10	5		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	3	0	0	4	0	1	5	5	3		5	
Castanea sativa	3	-1	3	-3	0	4	0	1	5	5	-4		3	
Juglans regia	5	-1	3	-3	1	4	4	2	5	10	11	+1	6	<---
Juglans nigra	5	-1	3	-3	1	4	4	1	5	5	9		5	
Juglans intermedia	5	-1	3	-3	1	4	4	2	5	10	11	+1	5	
Cedrus atlantica	4	-3	3	-9	0	4	0	2	5	10	-13	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	3	-9	0	4	0	2	5	10	-13	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	3	-9	0	4	0	2	5	10	-13	-1	3	<---

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US8
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	4	2	5	10	2	6	12	2	5	10	61	+3	6	<---
Quercus robur	5	0	5	0	1	6	6	0	5	0	18	+1	6	<---
Quercus petraea	3	0	5	0	0	6	0	0	5	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	5	-5	0	6	0	2	5	10	-5		2	
Acer pseudoplatanus	5	1	5	5	1	6	6	1	5	5	31	+2	6	<---
Fraxinus excelsior	5	1	5	5	1	6	6	1	5	5	31	+2	6	<---
Carpinus betulus	2	0	5	0	0	6	0	1	5	5	3		2	
Prunus avium	3	0	5	0	1	6	6	1	5	5	21	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	5	-5	0	6	0	2	5	10	-5		3	
Betula pendula	2	0	5	0	1	6	6	1	5	5	21	+1	3	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	5	0	0	6	0	2	5	10	5		3	
Larix kaempferi	4	0	5	0	2	6	12	1	5	5	39	+2	6	<---
Larix X eurolepis	3	0	5	0	1	6	6	1	5	5	21	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	5	0	0	6	0	0	5	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	5	0	0	6	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	5	0	0	6	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	5	0	0	6	0	2	5	10	5		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	5	0	0	6	0	0	5	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	5	0	0	6	0	1	5	5	3		5	
Castanea sativa	2	-1	5	-5	0	6	0	1	5	5	-8		2	
Juglans regia	5	-1	5	-5	1	6	6	2	5	10	13	+1	6	<---
Juglans nigra	4	-1	5	-5	1	6	6	1	5	5	11	+1	5	<---
Juglans intermedia	4	-1	5	-5	1	6	6	2	5	10	13	+1	5	<---
Cedrus atlantica	3	-3	5	-15	0	6	0	2	5	10	-25	-1	2	<---
Cedrus libani	3	-3	5	-15	0	6	0	2	5	10	-25	-1	2	<---
Cedrus deodora	3	-3	5	-15	0	6	0	2	5	10	-25	-1	2	<---

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US9
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	2	2	3	6	2	4	8	2	5	10	41	+2	4	<---
Quercus robur	4	0	3	0	1	4	4	0	5	0	12		4	
Quercus petraea	3	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	3	-3	0	4	0	2	5	10	-1		2	
Acer pseudoplatanus	3	1	3	3	1	4	4	1	5	5	21	+1	4	<---
Fraxinus excelsior	3	1	3	3	1	4	4	1	5	5	21	+1	4	<---
Carpinus betulus	2	0	3	0	0	4	0	1	5	5	3		2	
Prunus avium	3	0	3	0	1	4	4	1	5	5	15	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	3	-3	0	4	0	2	5	10	-1		3	
Betula pendula	1	0	3	0	1	4	4	1	5	5	15	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	3	0	0	4	0	2	5	10	5		3	<---
Larix kaempferi	3	0	3	0	2	4	8	1	5	5	27	+1	4	<---
Larix X eurolepis	3	0	3	0	1	4	4	1	5	5	15	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	3	0	0	4	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	3	0	0	4	0	2	5	10	5		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	3	0	0	4	0	2	5	10	5		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	3	0	0	4	0	0	5	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	3	0	0	4	0	1	5	5	3		5	
Castanea sativa	3	-1	3	-3	0	4	0	1	5	5	-4		3	
Juglans regia	5	-1	3	-3	1	4	4	2	5	10	11	+1	6	<---
Juglans nigra	5	-1	3	-3	1	4	4	1	5	5	9		5	
Juglans intermedia	5	-1	3	-3	1	4	4	2	5	10	11	+1	6	<---
Cedrus atlantica	4	-3	3	-9	0	4	0	2	5	10	-13	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	3	-9	0	4	0	2	5	10	-13	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	3	-9	0	4	0	2	5	10	-13	-1	3	<---

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US10
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	3	2	4	8	2	6	12	2	6	12	58	+3	6	<---
Quercus robur	4	0	4	0	1	6	6	0	6	0	18		4	
Quercus petraea	3	0	4	0	0	6	0	0	6	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	4	-4	0	6	0	2	6	12	-2		2	
Acer pseudoplatanus	3	1	4	4	1	6	6	1	6	6	29	+1	4	<---
Fraxinus excelsior	3	1	4	4	1	6	6	1	6	6	29	+1	4	<---
Carpinus betulus	2	0	4	0	0	6	0	1	6	6	3		2	
Prunus avium	3	0	4	0	1	6	6	1	6	6	21	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	4	-4	0	6	0	2	6	12	-2		3	
Betula pendula	1	0	4	0	1	6	6	1	6	6	21	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	4	0	0	6	0	2	6	12	6		3	<---
Larix kaempferi	3	0	4	0	2	6	12	1	6	6	39	+2	5	<---
Larix X eurolepis	3	0	4	0	1	6	6	1	6	6	21	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	4	0	0	6	0	0	6	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	4	0	0	6	0	2	6	12	6		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	4	0	0	6	0	2	6	12	6		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	4	0	0	6	0	2	6	12	6		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	4	0	0	6	0	0	6	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	4	0	0	6	0	1	6	6	3		5	
Castanea sativa	3	-1	4	-4	0	6	0	1	6	6	-5		3	
Juglans regia	5	-1	4	-4	1	6	6	2	6	12	16	+1	6	<---
Juglans nigra	4	-1	4	-4	1	6	6	1	6	6	13	+1	5	<---
Juglans intermedia	4	-1	4	-4	1	6	6	2	6	12	16	+1	5	<---
Cedrus atlantica	4	-3	4	-12	0	6	0	2	6	12	-18	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	4	-12	0	6	0	2	6	12	-18	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	4	-12	0	6	0	2	6	12	-18	-1	3	<---

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US11
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	3	2	3	6	2	5	10	2	6	12	48	+2	5	<---
Quercus robur	4	0	3	0	1	5	5	0	6	0	15	+1	5	<---
Quercus petraea	3	0	3	0	0	5	0	0	6	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	3	-3	0	5	0	2	6	12	0		2	
Acer pseudoplatanus	3	1	3	3	1	5	5	1	6	6	24	+1	4	<---
Fraxinus excelsior	3	1	3	3	1	5	5	1	6	6	24	+1	4	<---
Carpinus betulus	2	0	3	0	0	5	0	1	6	6	3		2	
Prunus avium	3	0	3	0	1	5	5	1	6	6	18	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	3	-3	0	5	0	2	6	12	0		3	
Betula pendula	1	0	3	0	1	5	5	1	6	6	18	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	3	0	0	5	0	2	6	12	6		3	
Larix kaempferi	3	0	3	0	2	5	10	1	6	6	33	+2	5	<---
Larix X eurolepis	3	0	3	0	1	5	5	1	6	6	18	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	3	0	0	5	0	0	6	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	3	0	0	5	0	2	6	12	6		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	3	0	0	5	0	2	6	12	6		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	3	0	0	5	0	2	6	12	6		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	3	0	0	5	0	0	6	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	3	0	0	5	0	1	6	6	3		5	
Castanea sativa	3	-1	3	-3	0	5	0	1	6	6	-3		3	
Juglans regia	5	-1	3	-3	1	5	5	2	6	12	15	+1	6	<---
Juglans nigra	5	-1	3	-3	1	5	5	1	6	6	12	+1	6	<---
Juglans intermedia	5	-1	3	-3	1	5	5	2	6	12	15	+1	6	<---
Cedrus atlantica	4	-3	3	-9	0	5	0	2	6	12	-12	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	3	-9	0	5	0	2	6	12	-12	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	3	-9	0	5	0	2	6	12	-12	-1	3	<---

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US12
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	4	2	5	10	2	7	14	2	6	12	68	+3	6	<---
Quercus robur	5	0	5	0	1	7	7	0	6	0	21	+1	6	<---
Quercus petraea	3	0	5	0	0	7	0	0	6	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	5	-5	0	7	0	2	6	12	-4		2	
Acer pseudoplatanus	5	1	5	5	1	7	7	1	6	6	34	+2	6	<---
Fraxinus excelsior	5	1	5	5	1	7	7	1	6	6	34	+2	6	<---
Carpinus betulus	2	0	5	0	0	7	0	1	6	6	3		2	
Prunus avium	3	0	5	0	1	7	7	1	6	6	24	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	5	-5	0	7	0	2	6	12	-4		3	
Betula pendula	2	0	5	0	1	7	7	1	6	6	24	+1	3	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	5	0	0	7	0	2	6	12	6		3	
Larix kaempferi	4	0	5	0	2	7	14	1	6	6	45	+2	6	<---
Larix X eurolepis	3	0	5	0	1	7	7	1	6	6	24	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	5	0	0	7	0	0	6	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	5	0	0	7	0	2	6	12	6		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	5	0	0	7	0	2	6	12	6		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	5	0	0	7	0	2	6	12	6		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	5	0	0	7	0	0	6	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	5	0	0	7	0	1	6	6	3		5	
Castanea sativa	2	-1	5	-5	0	7	0	1	6	6	-7		2	
Juglans regia	5	-1	5	-5	1	7	7	2	6	12	17	+1	6	<---
Juglans nigra	4	-1	5	-5	1	7	7	1	6	6	14	+1	5	<---
Juglans intermedia	4	-1	5	-5	1	7	7	2	6	12	17	+1	5	<---
Cedrus atlantica	3	-3	5	-15	0	7	0	2	6	12	-24	-1	2	<---
Cedrus libani	3	-3	5	-15	0	7	0	2	6	12	-24	-1	2	<---
Cedrus deodora	3	-3	5	-15	0	7	0	2	6	12	-24	-1	2	<---

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US13
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	2	2	3	6	2	5	10	2	6	12	48	+2	4	<---
Quercus robur	4	0	3	0	1	5	5	0	6	0	15	+1	5	<---
Quercus petraea	3	0	3	0	0	5	0	0	6	0	0		3	
Quercus rubra	2	-1	3	-3	0	5	0	2	6	12	0		2	
Acer pseudoplatanus	3	1	3	3	1	5	5	1	6	6	24	+1	4	<---
Fraxinus excelsior	3	1	3	3	1	5	5	1	6	6	24	+1	4	<---
Carpinus betulus	2	0	3	0	0	5	0	1	6	6	3		2	
Prunus avium	3	0	3	0	1	5	5	1	6	6	18	+1	4	<---
Robinia pseudoacacia	3	-1	3	-3	0	5	0	2	6	12	0		3	
Betula pendula	1	0	3	0	1	5	5	1	6	6	18	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	3	0	0	5	0	2	6	12	6		3	
Larix kaempferi	3	0	3	0	2	5	10	1	6	6	33	+2	5	<---
Larix X eurolepis	3	0	3	0	1	5	5	1	6	6	18	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	3	0	0	5	0	0	6	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	3	0	0	5	0	2	6	12	6		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	3	0	0	5	0	2	6	12	6		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	3	0	0	5	0	2	6	12	6		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	3	0	0	5	0	0	6	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	3	0	0	5	0	1	6	6	3		5	
Castanea sativa	3	-1	3	-3	0	5	0	1	6	6	-3		3	
Juglans regia	5	-1	3	-3	1	5	5	2	6	12	15	+1	6	<---
Juglans nigra	5	-1	3	-3	1	5	5	1	6	6	12	+1	6	<---
Juglans intermedia	5	-1	3	-3	1	5	5	2	6	12	15	+1	6	<---
Cedrus atlantica	4	-3	3	-9	0	5	0	2	6	12	-12	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	3	-9	0	5	0	2	6	12	-12	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	3	-9	0	5	0	2	6	12	-12	-1	3	<---

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US14
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	4	2	3	6	2	3	6	2	3	6	33	+2	6	<---
Quercus robur	3	0	3	0	1	3	3	0	3	0	9		3	
Quercus petraea	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		3	
Quercus rubra	3	-1	3	-3	0	3	0	2	3	6	-3		3	
Acer pseudoplatanus	4	1	3	3	1	3	3	1	3	3	17	+1	5	<---
Fraxinus excelsior	4	1	3	3	1	3	3	1	3	3	17	+1	5	<---
Carpinus betulus	3	0	3	0	0	3	0	1	3	3	2		3	
Prunus avium	5	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	6	<---
Robinia pseudoacacia	4	-1	3	-3	0	3	0	2	3	6	-3		4	
Betula pendula	2	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	3	<---
Résineux											0			
Larix decidua	4	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		4	
Larix kaempferi	3	0	3	0	2	3	6	1	3	3	20	+1	4	<---
Larix X eurolepis	3	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	4	<---
Pinus sylvestris	2	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		2	
Pinus nigra (laricio)	4	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		4	
Pinus nigra (nigra)	4	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		4	
Pinus nigra (koekelare)	5	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		5	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		3	
Tilia platyphyllos	5	0	3	0	0	3	0	1	3	3	2		5	
Castanea sativa	5	-1	3	-3	0	3	0	1	3	3	-5		5	
Juglans regia	5	-1	3	-3	1	3	3	2	3	6	6		5	
Juglans nigra	5	-1	3	-3	1	3	3	1	3	3	5		5	
Juglans intermedia	5	-1	3	-3	1	3	3	2	3	6	6		5	
Cedrus atlantica	5	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	4	<---
Cedrus libani	5	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	4	<---
Cedrus deodora	5	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	4	<---

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US15
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	3	2	2	4	2	2	4	2	2	4	22	+1	4	<---
Quercus robur	5	0	2	0	1	2	2	0	2	0	6		5	
Quercus petraea	3	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		3	
Quercus rubra	3	-1	2	-2	0	2	0	2	2	4	-2		3	
Acer pseudoplatanus	5	1	2	2	1	2	2	1	2	2	11	+1	6	<---
Fraxinus excelsior	5	1	2	2	1	2	2	1	2	2	11	+1	6	<---
Carpinus betulus	2	0	2	0	0	2	0	1	2	2	1		2	
Prunus avium	4	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		4	
Robinia pseudoacacia	3	-1	2	-2	0	2	0	2	2	4	-2		3	
Betula pendula	1	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		1	
Résineux											0			
Larix decidua	3	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		3	
Larix kaempferi	3	0	2	0	2	2	4	1	2	2	13	+1	4	<---
Larix X eurolepis	3	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		3	
Pinus sylvestris	1	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	1	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		1	
Pinus nigra (nigra)	1	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		1	
Pinus nigra (koekelare)	1	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		1	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	2	0	0	2	0	1	2	2	1		5	
Castanea sativa	5	-1	2	-2	0	2	0	1	2	2	-3		5	
Juglans regia	5	-1	2	-2	1	2	2	2	2	4	4		5	
Juglans nigra	5	-1	2	-2	1	2	2	1	2	2	3		5	
Juglans intermedia	5	-1	2	-2	1	2	2	2	2	4	4		5	
Cedrus atlantica	4	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	3	<---
Cedrus deodora	5	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	4	<---

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US16
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	5	2	3	6	2	3	6	2	3	6	33	+2	6	<---
Quercus robur	5	0	3	0	1	3	3	0	3	0	9		5	
Quercus petraea	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		3	
Quercus rubra	3	-1	3	-3	0	3	0	2	3	6	-3		3	
Acer pseudoplatanus	5	1	3	3	1	3	3	1	3	3	17	+1	6	<---
Fraxinus excelsior	4	1	3	3	1	3	3	1	3	3	17	+1	5	<---
Carpinus betulus	2	0	3	0	0	3	0	1	3	3	2		2	
Prunus avium	4	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	5	<---
Robinia pseudoacacia	4	-1	3	-3	0	3	0	2	3	6	-3		4	
Betula pendula	1	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	2	<---
Résineux											0			
Larix decidua	4	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		4	
Larix kaempferi	3	0	3	0	2	3	6	1	3	3	20	+1	4	<---
Larix X eurolepis	3	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	4	<---
Pinus sylvestris	1	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		1	
Pinus nigra (laricio)	2	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		2	
Pinus nigra (nigra)	2	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		2	
Pinus nigra (koekelare)	2	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		2	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	2	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		2	
Tilia platyphyllos	5	0	3	0	0	3	0	1	3	3	2		5	
Castanea sativa	4	-1	3	-3	0	3	0	1	3	3	-5		4	
Juglans regia	5	-1	3	-3	1	3	3	2	3	6	6		5	
Juglans nigra	5	-1	3	-3	1	3	3	1	3	3	5		5	
Juglans intermedia	5	-1	3	-3	1	3	3	2	3	6	6		5	
Cedrus atlantica	4	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	3	<---

Annexes

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US17
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	5	2	3	6	2	3	6	2	3	6	33	+2	6	<---
Quercus robur	6	0	3	0	1	3	3	0	3	0	9		6	
Quercus petraea	5	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		5	
Quercus rubra	3	-1	3	-3	0	3	0	2	3	6	-3		3	
Acer pseudoplatanus	6	1	3	3	1	3	3	1	3	3	17	+1	6	
Fraxinus excelsior	6	1	3	3	1	3	3	1	3	3	17	+1	6	
Carpinus betulus	4	0	3	0	0	3	0	1	3	3	2		4	
Prunus avium	6	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	6	
Robinia pseudoacacia	3	-1	3	-3	0	3	0	2	3	6	-3		3	
Betula pendula	3	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	4	<---
Résineux											0			
Larix decidua	4	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		4	
Larix kaempferi	5	0	3	0	2	3	6	1	3	3	20	+1	6	<---
Larix X eurolepis	5	0	3	0	1	3	3	1	3	3	11	+1	6	<---
Pinus sylvestris	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		3	
Pinus nigra (laricio)	4	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		4	
Pinus nigra (nigra)	4	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		4	
Pinus nigra (koekelare)	5	0	3	0	0	3	0	2	3	6	3		5	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	4	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0		4	
Tilia platyphyllos	6	0	3	0	0	3	0	1	3	3	2		6	
Castanea sativa	6	-1	3	-3	0	3	0	1	3	3	-5		6	
Juglans regia	6	-1	3	-3	1	3	3	2	3	6	6		6	
Juglans nigra	6	-1	3	-3	1	3	3	1	3	3	5		6	
Juglans intermedia	6	-1	3	-3	1	3	3	2	3	6	6		6	
Cedrus atlantica	4	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	3	<---
Cedrus deodora	5	-3	3	-9	0	3	0	2	3	6	-15	-1	4	<---

Essences	Aptitude actuelle	Augmentation T°			Episodes secs			P° hivernales			Risque total		Aptitude 2100	US18
		S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	S	RC	S*RC	a	b		
Feuillus														
Fagus sylvatica	6	2	2	4	2	2	4	2	2	4	22	+1	6	
Quercus robur	6	0	2	0	1	2	2	0	2	0	6		6	
Quercus petraea	5	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		5	
Quercus rubra	4	-1	2	-2	0	2	0	2	2	4	-2		4	
Acer pseudoplatanus	6	1	2	2	1	2	2	1	2	2	11	+1	6	
Fraxinus excelsior	6	1	2	2	1	2	2	1	2	2	11	+1	6	
Carpinus betulus	6	0	2	0	0	2	0	1	2	2	1		6	
Prunus avium	6	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		6	
Robinia pseudoacacia	3	-1	2	-2	0	2	0	2	2	4	-2		3	
Betula pendula	3	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		3	
Résineux											0			
Larix decidua	5	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		5	
Larix kaempferi	6	0	2	0	2	2	4	1	2	2	13	+1	6	
Larix X eurolepis	2	0	2	0	1	2	2	1	2	2	7		2	
Pinus sylvestris	2	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		2	
Pinus nigra (laricio)	2	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		2	
Pinus nigra (nigra)	2	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		2	
Pinus nigra (koekelare)	2	0	2	0	0	2	0	2	2	4	2		2	
Essences supplémentaires											0			
Tilia cordata	5	0	2	0	0	2	0	0	2	0	0		5	
Tilia platyphyllos	6	0	2	0	0	2	0	1	2	2	1		6	
Castanea sativa	6	-1	2	-2	0	2	0	1	2	2	-3		6	
Juglans regia	6	-1	2	-2	1	2	2	2	2	4	4		6	
Juglans nigra	6	-1	2	-2	1	2	2	1	2	2	3		6	
Juglans intermedia	6	-1	2	-2	1	2	2	2	2	4	4		6	
Cedrus atlantica	4	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	3	<---
Cedrus libani	4	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	3	<---
Cedrus deodora	4	-3	2	-6	0	2	0	2	2	4	-10	-1	3	<---